

**А.М. ГОЛИКОВ**

**СИСТЕМОТЕХНИКА.  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

**Курс лекций, компьютерный практикум, компьютерные  
лабораторные работы, задание  
на самостоятельную работу**

**Томск 2018**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники**

**А.М. ГОЛИКОВ**

**СИСТЕМОТЕХНИКА.  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

**Курс лекций, компьютерный практикум, компьютерные  
лабораторные работы, задание на самостоятельную работу**

**Томск 2018**

Голиков А.М.

Системотехника. Проектирование радиотехнических систем. Учебное пособие: Курс лекций, компьютерный практикум, компьютерные лабораторные работы и задание на самостоятельную работу /А.М.Голиков. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 543 с

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов: 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы. Специализации: Радиолокационные системы и комплексы, Радиоэлектронные системы передачи информации, Радиоэлектронные системы космических комплексов. Для магистратуры: 11.04.01 - Радиотехника (Радиотехнические системы и комплексы). Для магистратуры: 12.04.03 - Фотоника и оптоинформатика (Фотоника волноводных, нелинейных и периодических структур).

Современные учебные курсы редко рассматривают комплексно вопросы системотехники и проектирования больших радиотехнических систем. Мало учебников и для исследования компьютерных моделей современных систем. Актуальность пособия велика, так как в современных радиотехнических системах применяются все более сложные технические решения, обеспечивающие их высокую эффективность.

Курс системотехника также призван научить будущих специалистов и магистров основам выполнения НИОКР, рассмотреть этапы проектирования, требуемую техническую документацию для их выполнения.

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОСНОВЫ СИСТЕМОТЕХНИКИ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА.....	6
2. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	30
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ.....	79
4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ .....	169
5. КОМПЬЮТЕРНЫЙ И ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	
ПО СИСТЕМОТЕХНИКЕ .....	210
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	420
ЛИТЕРАТУРА.....	421
ПРИЛОЖЕНИЕ А: ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ.....	426
ПРИЛОЖЕНИЕ Б: ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. НИОКР РТС.....	444



## **ВВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие предназначено для подготовки специалистов: 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы. Специализации: Радиолокационные системы и комплексы, Радиоэлектронные системы передачи информации, Радиоэлектронные системы космических комплексов. Для магистратуры: 11.04.01 - Радиотехника (Радиотехнические системы и комплексы). Для магистратуры: 12.04.03 - Фотоника и оптоинформатика (Фотоника волноводных, нелинейных и периодических структур). может быть полезна специалисту 25.05.03 Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования и магистратуре 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Современные учебные курсы редко рассматривают комплексно вопросы системотехники и проектирования больших радиотехнических систем. Мало учебников и для исследования компьютерных моделей современных систем. Актуальность пособия велика, так как в современных радиотехнических системах применяются все более сложные технические решения, обеспечивающие их высокую эффективность.

Курс системотехника также призван научить будущих специалистов и магистров основам выполнения НИОКР, рассмотреть этапы проектирования, требуемую техническую документацию для их выполнения.

История развития системных представлений первоначально шла по нескольким отдельным направлениям. Большой вклад в осознание системности материи и человеческого познания внесла философия — «наука наук», выполняющая роль интеграции, организации взаимосвязей и взаимодействия между различными научными направлениями. Результаты философии относятся к множеству всех существующих и мыслимых систем, носят всеобщий характер.

## 1. ОСНОВЫ СИСТЕМОТЕХНИКИ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Массовое усвоение системных понятий началось в 1948 г., когда американский математик Норберт Винер опубликовал книгу «Кибернетика» [1]. Н. Винер крупно продвинулся в формализации процессов управления в больших технических системах, созданных на принципах поведения живых организмов. Впоследствии многие подходы и методы кибернетики были перенесены на управление организационными системами. Благодаря кибернетике в системном анализе сформировались следующие подходы: типизация моделей систем; формализация процессов управления; информационное моделирование и вычислительные эксперименты; оптимизация процессов и систем.



Рис. 1.1. Основные направления системных исследований

**Исследование операций** возникло в связи с задачами военного характера, однако в дальнейшем получило широкое распространение в экономических задачах, при решении проблем организации производства и управления предприятиями. Это направление широко использует математический аппарат, в частности, методы оптимизации, математического программирования и математической статистики. Наиболее хорошо разработаны модели и алгоритмы для следующих классов задач исследования операций: управление запасами, массовое обслуживание, выбор маршрута, упорядочение и координация, принятие решений в условиях противодействия [2].

Термин **системотехника** появился как эквивалент английского System Engineering при переводе книги Г. Гуда и Р. Макола [3]. Развитию этого направления в нашей стране активно способствовал Темников Ф.Е., организовавший в 1969 г. кафедру системотехники в Московском энергетическом институте. Объектом системотехники являются сложные

технические комплексы, называемые также системами «человек - машина», интегрированными системами, большими системами, системотехническими комплексами. Целью исследований являются методы создания, совершенствования и использования сложных технических комплексов [4].

**Системология** (термин предложен в 1965 г. И.Б. Новиком) создавалась как одно из направлений теории систем, ориентированное на применение системного подхода в разных сферах человеческой деятельности. Некоторые исследователи используют термин «системология» как аналог «системного анализа», однако фактически сложилось так, что большинство работ по системологии рассматривают онтологические, семиотические и лингвистические аспекты системного подхода (например, работы Мельникова [5], Дж. Клира [6]).

Наиболее конструктивным из направлений системных исследований в настоящее время считается **системный анализ**. В центре внимания этой научной дисциплины находятся методы ликвидации сложных проблем в условиях неполноты информации, ограниченности ресурсов, дефицита времени [2]. Имея в качестве цели ликвидацию проблемы или, как минимум, выяснение причин её возникновения, системный анализ привлекает для этого широкий спектр средств различных наук, а также эвристические методы решения слабо структурированных и не полностью формализованных задач. Его теоретической основой является материалистическая диалектика (в [2] системный анализ определяется как прикладная диалектика), общая теория систем и кибернетика. С практической точки зрения системный анализ есть система методов исследования или проектирования сложных систем для ликвидации проблемных ситуаций. Наиболее известные ученые, развивающие это направление, — С. Оптнер, Ю.И. Черняк, Д. Клиланд, В. Кинг, Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко, В.Н. Волкова и др.

Систему знаний, включаемых в дисциплину «Теория систем и системный анализ», можно представить в виде пирамиды (рис.1.2), уровни которой расположены таким

образом, что чем выше уровень, тем более прикладной, характер носящего составляющие



Рис. 1.2. Уровни знаний, составляющих дисциплину «Теория систем и системный анализ»

**Основание пирамиды** составляют основополагающие понятия теории систем и системного анализа, свойства и закономерности строения, функционирования и развития систем, изложению которых посвящен *первый раздел* данного пособия. Также в разделе даются основы информационного подхода к анализу систем, приводится их классификация. **На втором уровне** расположены основные методы и модели теории систем и системного анализа. Их описание приводится *во втором разделе*. Все приводимые методы и модели сгруппированы в соответствии с тремя базовыми моделями систем — моделью черного ящика, моделью состава и моделью структуры — отражающими три подхода к рассмотрению системы. Модель черного ящика рассматривает систему как целостный объект, описываемый набором свойств. Основными вопросами, связанными с построением подобных моделей, являются вопросы выбора шкалы измерения/оценки свойств системы, способа измерения в условиях определенности и неопределенности, методов обработки результатов измерений. Модель состава рассматривает систему как совокупность частей (подсистем, элементов). Для формирования такого рода моделей применяются методы декомпозиции — последовательного расчленения системы на все более мелкие части с использованием различных оснований декомпозиции, а также методы композиции, использующие комбинаторный подход к формированию подсистем. В модели структуры системы акцент переносится на отношения между частями системы. Методы формирования таких моделей зависят от типа отношений, включаемых в модель. Так, различия между такими видами иерархий, как страты, слои, эшелоны и классы, определяются, прежде всего, используемыми отношениями. **Третий уровень знаний**, включаемых в дисциплину, пред-

ставлен методологиями системного анализа. Их назначение — разрешение сложных многофакторных проблем посредством приложения теории систем. Методология фиксирует содержание и последовательность действий по принятию и реализации решений, устраняющих проблему. Базовая методология системного анализа представлена в виде так называемой системной последовательности этапов принятия решений. Выбор конкретных моделей и методов, используемых на том или ином этапе, остается за системным аналитиком. Большинство методов предполагает выявление мнений экспертов и требует выполнения сложных экспертиз.

Базовая методология является отправной точкой для создания различных прикладных методологий системного анализа, в основу каждой из которых положена та или иная методология моделирования. Выделяют две основные группы прикладных методологий: структурный анализ и логический анализ. В центре внимания первой находится структурная модель исследуемой системы, представленная в виде иерархии подсистем, связанных отношениями «часть-целое». Вторая группа базируется на моделях, связывающих цели со средствами их достижения. Как правило, такие модели тоже представляют собой иерархии, но построены они на основе причинно-следственных связей. Базовая методология системного анализа, методы организации экспертиз, а также ряд методологий структурного и логического анализа приведены *в третьем разделе*. **Верхний уровень компонентов** теории систем и системного анализа составляют технологии проведения системного анализа. Их рассмотрению посвящен *четвертый раздел*. Технологии отличаются от методологий более четкой организацией процесса системного анализа, наличием конкретных рекомендаций относительно последовательности этапов анализа, состава работ и используемых процедур, методов и моделей. Кроме того, как правило, технологии предполагают использование компьютерных инструментальных систем поддержки. Большинство существующих системных технологий являются специализированными, ориентированными на конкретные виды систем, например, CASE-технологии разработки информационных систем, технологии реинжиниринга бизнес-процессов, САПР-технологии разработки технических систем. Универсальной, ориентированной на широкий класс систем, можно считать объектно-ориентированную технологию системного анализа. *В пятом разделе* рассматриваются примеры применения описанных в предыдущих разделах принципов, методов, моделей, методологий и технологий для решения сложных задач в таких областях, как экономический анализ, проектирование и развитие систем организационного управления, анализ информационных ресурсов

В процессе своей жизнедеятельности системы проходят определенные этапы — становление, расцвет, упадок. Последовательность этапов от возникновения до распада системы называется **жизненным циклом (ЖЦ)**. Поведение системы (траектория движения в пространстве состояний) на разных этапах различно. На рис. 3 приведен пример траектории в пространстве, задаваемом интегральным параметром «эффективность». Этапы жизненного цикла следуют в строгой последовательности и характеризуются определенными предсказуемыми состояниями.

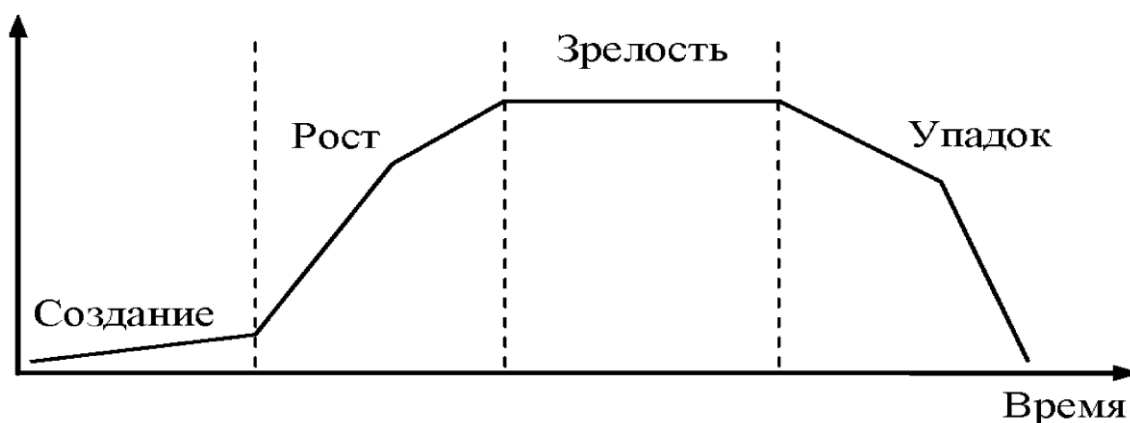


Рис. 1.3. Жизненный цикл системы

Для различных видов систем выделяют различные типовые этапы жизненного цикла. Например, для информационных систем, как правило, выделяют такие этапы жизненного цикла, как анализ требований, проектирование, реализация, компоновка, тестирование, эксплуатация. В менеджменте есть понятие жизненного цикла изделия, включающего этапы: исследований и разработок, внедрения на рынок, расширения рынка, зрелости, насыщения рынка, вытеснения с рынка и реализации остатков готовой продукции. Для социально-эко-номических систем (организаций) выделяют этапы предпринимательства, формализации управления, выработки структуры, упадка. Прохождение системами определенных стадий развития называется закономерностью **историчности**. Руководителям организаций и проектов, конструкторам информационных и технических систем следует учитывать данную закономерность, так как это помогает правильно выбрать стратегию управления. **Устойчивость, развитие.** Состояние системы в каждый момент времени зависит от предыдущего состояния, а также от внутренних и внешних взаимодействий. При этом взаимодействия могут быть непредсказуемыми, неопределенными. Они называются **возмущениями** или **возмущающими воздействиями**.

**Классификация моделей.** Классификация моделей осуществляется по разным признакам. Некоторые из классификаций моделей приведены на рис. 4. По тому, что отражают модели — уже существующие объекты или объекты, которые должны быть осуществлены (или которые желательно осуществить), — их можно разделить на

**познавательные и нормативные.** В методологиях моделирования бизнес-процессов эти классы моделей часто называют моделями «как есть» (в английском варианте — as is) и «как должно быть» (в английском варианте — to be) или моделями существующего и нового бизнеса.



Рис. 1.4. Классификации моделей

**Этапы системного анализа.** Объектом рассмотрения системного анализа является процесс поиска средств ликвидации некоторой сложной многофакторной проблемы. Декомпозиция по жизненному циклу данного процесса позволяет выделить этапы, так называемой, системной последовательности принятия решений, составляющей основу регламента проведения системного анализа. Имеется множество различных вариантов системной последовательности, в частности регламенты, предложенные С.Л. Опт-нером, С. Янгом, Э. Квейдом, Ю.И. Черняком, Л. Планкеттом и Г. Хейлом, Н.П. Федоренко, С.П. Никаноровым, коллективом томских ученых под руководством Ф.И. Перегудова [2]. Анализ существующих регламентов показывает, что можно выделить пять укрупненных этапов, представленных практически во всех вариантах системной последовательности в том или ином виде (рис. 1.5): 1) **анализ ситуации** — выявление проблемы, определение актуальности проблемы, анализ проблемы, выявление изменений, выявление причин; 2) **постановка целей** — формулирование целей, формирование критериев и ограничений; 3) **выработка решений** — разработка альтернатив, оценка и выбор альтернатив, согласование решений; 4) **реализация решений** — утверждение решений, подготовка к внедрению, управление процессом реализации; 5) **оценивание результатов** — оценка реализации и ее последствий, проверка эффективности. Последний этап замыкает цикл и возвращает процесс к первому этапу, но для следующей итерации.



Рис. 1.5. Основные этапы системного анализа

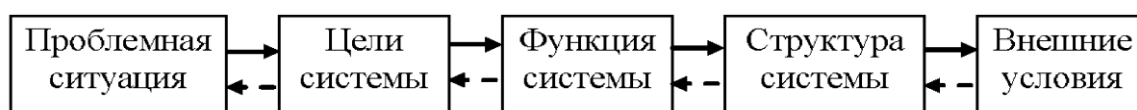


Рис. 1.6. Последовательность проектирования и реализации системы

При анализе многоуровневых систем встает вопрос о выборе стратегии иерархического принятия решения. Различают следующие основные стратегии: «сверху – вниз», «снизу – вверх», «смешанная стратегия». Выбор наиболее предпочтительной стратегии решается в разных регламентах по-разному. Довольно часто встречается перестановка этапов анализа ситуации и постановки целей, так как нет однозначного понимания, что чему должно предшествовать. Вопрос о том, что первично — проблема или цель, подобен вопросу о курице и яйце. С одной стороны, цель ставится при наличии проблемы (для ее ликвидации) с учетом сложившейся ситуации, иначе цель будет оторвана от реальности и слишком расплывчата. С другой стороны, проблема – это расхождение между желаемым (целью) и реальным состоянием, т. е. для выявления проблемы нужна цель. Как правило, эта дилемма решается следующим образом. Системный аналитик первоначально имеет некое, возможно расплывчатое, приблизительное представление о проблеме и о цели. В ходе анализа ситуации появляется дополнительная информация о проблеме, позволяющая ставить конкретные и достижимые цели. Причем после постановки целей может быть уточнена и проблема. Может даже понадобиться дополнительный анализ ситуации.

Необходимо отметить тенденцию к уменьшению жесткости регламента. Так, в [1] предлагается по окончании любого этапа (подэтапа) осуществлять оценку результата его выполнения, по итогам которой может быть принято решение о повторном выполнении этапа с целью корректировки полученных решений или о возврате на предыдущие этапы. Может быть выполнено несколько итераций для каждого из этапов. Такая нелинейность является неизбежным следствием сложности процесса: «Алгоритм решения конкретной



проблемы не будет линейным, будет содержать циклы, возвраты. По сути, это другое представление метода проб и ошибок: решение проблемы есть преодоление сложности». Несмотря на все различия в существующих регламентах системного анализа, назначение и сущность основных эта-пов, а также основные принципы их выполнения остаются неизменными. Рассмотрим подробнее содержание основных этапов системной последовательности принятия решений. **Анализ ситуации.** Цель данного этапа — выявление, формулирование проблемы. Поскольку проблемой называется разрыв между желаемым и действительным состояниями, то для ее выявления необходимо описать существующую си-туацию и сравнить ее с «идеальной», т. е. с требованиями, стандартами, целями. Требования могут выдвигаться различ-ными заинтересованными сторонами — участниками проб-лемы. Их называют также акторами, стейкхолдерами (от англ. stakeholders — «держатели ставок»). К ним могут относиться субъекты, входящие как в проблемосодержащую систему, так и во внешнюю среду. Так, при анализе положения дел в производственной системе необходимо проанализировать соответствие процессов требованиям со стороны клиентов, постав-щиков, партнеров, вышестоящих организаций. Для выявления проблем полезно оценить уровень разви-тия исследуемой системы в сравнении с аналогичными системами. Например, при оценке уровня компании осу-ществляется сравнение показателей ее деятельности с показателями других фирм-лидеров, имеющих аналогичные процессы. Метод улучшения текущей деятельности организации посредством изучения того, как другие выполняют похожие операции, называется бенчмаркинг (benchmarking). В его основе лежит сравнение ключевых бизнес-процессов компании с лучшими эквивалентными процессами. Основываясь на срав-нительном анализе, определяют несколько организаций, имею-щих наилучшие показатели. После чего процессы выбранных организаций изучаются для того, чтобы определить, почему они функционируют лучше.

Важно проанализировать не только достигнутое текущее состояние исследуемой системы, но и динамику изменения ее состояний, установить тенденции, закономерности в функцио-нировании системы на основе обобщения прошлого опыта. Исходной информацией для ретроспективного анализа явля-ются данные об изменении основных показателей деятельно-сти системы за определенный предшествующий период (по годам, кварталам, месяцам и т. д.). Для наглядности подоб-ную информацию можно представить в виде графиков. Тип графика (полученной аппроксимирующей кривой или прямой линии) наглядно характеризует процесс: его устойчивость, тенденцию, наличие резких колебаний. Полезно на основе выявленных тенденций спрогнозировать будущее развитие си-туации при условии, если не будут предприняты действия по ее изменению. Еще один

вид анализа — причинный (каузальный) — используется для выявления причин возникновения текущей ситуации. В процессе анализа могут быть построены причинно-следственные цепочки или обратные сценарии, показывающие, какие условия могли привести к возникновению проблемы. Для выявления закономерностей развития ситуации зачастую используются статистические методы, позволяющие определить наличие причинных связей между показателями, степень влияния показателей друг на друга и т. д. Этот вид анализа называется факторным.

Анализ проблемосодержащей системы может осуществляться на разных уровнях абстрагирования. Декомпозиция системы на составляющие и анализ отдельных подсистем (сравнительный, ретроспективный, причинный) помогает локализовать проблему. При этом разложение системы может быть основано на выделении не только составных частей, но и различных аспектов, точек зрения на систему. Так, для производственных систем могут быть выделены: экономический аспект, технологический, организационный. Описание того или иного аспекта осуществляется на соответствующем языке. Например, экономический аспект отражается с помощью языка экономики, технологический — с помощью профессионального языка технолога, организационный — с помощью понятий теории менеджмента. Таким образом, одна и та же проблемосодержащая система может быть представлена множеством моделей на различных профессиональных языках, составляющих так называемый конфигуратор. *Конфигуратором* называется «набор различных языков описания изучаемой системы, достаточный для проведения системного анализа данной проблемы» [2]. Он определяется природой проблемосодержащей и проблеморазрешающей систем. **Постановка целей.** На данном этапе определяется, к чему должно привести устранение проблемы. Если на этапе анализа определяется, что именно не устраивает в текущей ситуации, то здесь выявляется представление, что должно быть достигнуто. При формировании целей необходимо учитывать *закономерности целеобразования*. Рассмотрим некоторые из них. **1. Расплывчатость, изменчивость целей.** Цели никогда не удастся сформулировать сразу окончательно ясно. Дело в том, что цель — это описание желаемого будущего, и поэтому в нем легко допустить неточности, а то и ошибиться [2]. Как правило, первоначально цель формулируется очень расплывчато. По мере исследования проблемосодержащей системы, накопления информации цели постепенно уточняются, детализируются. Нужно отметить, что зачастую стремление сразу сформулировать цель предельно четко несет в себе ту опасность, что она подменяется средствами, т. е. в формулировке заранее фиксируется способ достижения цели, что значительно сужает пространство поиска решений, фиксирует только один путь решения проблемы. Например, цель «разработать информационную систему проверки

пользовательского кредита для сокращения сроков обслуживания клиентов» содержит предположение, что темпы обслуживания могут быть увеличены только за счет автоматизации операции проверки. На самом деле, возможно, проверка вообще не нужна. Изначально цель должна определять только конечный результат, а не способ его достижения.

Не только недостаток информации является причиной неизбежности корректировки целей с течением времени, но и изменение условий, а также требований — как со стороны элементов внешней среды, так и со стороны элементов самой системы. Некоторые цели, запланированные в начале, могут оказаться нереалистичными, так как для их достижения недостаточно времени или имеющихся ресурсов. Существует противоречие между сложностью точного описания целей и необходимостью оценки степени достижения целей при использовании того или иного решения. Для конкретизации целей используют критерии — измеримые индикаторы. Например, цель «повысить качество продукции» может быть конкретизирована с помощью критериев «срок годности», «ремонтопригодность», «безопасность» и др. Критерии позволяют сравнивать альтернативные варианты достижения целей, упорядочивать их по степени предпочтительности. После того как решение уже будет выбрано, плановые значения критериев могут использоваться для контроля хода выполнения решения и оценки того, достигнута ли цель.

**2. Множественность целей.** Как правило, одна единственная цель не может дать представление о желаемом будущем. Даже если и формулируется глобальная цель, она должна быть конкретизирована через подчиненные цели. Например, цель «повысить эффективность деятельности компании» слишком абстрактна, чтобы быть отправной точкой для поиска способов ее достижения. Желательно сформулировать цели, раскрывающие понятие эффективности. Причиной множественности целей зачастую является множественность проблем, составляющих проблематику. Необходимость решения совокупности разнообразных проблем неизбежно приводит к постановке множества целей. Так, если при анализе проблемы низкого уровня развития энергосбережения было выявлено, что причинами являются: недостаточная информированность компаний об энергосберегающих технологиях, отсутствие нормативно-правовой базы и низкая заинтересованность в экономии энергии, то и цели должны определять желаемое состояние по соответствующим направлениям.

Другая причина кроется в разнообразии интересов заинтересованных сторон, связанных с решаемой проблемой. Необходимо учитывать требования со стороны субъектов внешней среды, связанных с системой, а также со стороны субъектов, входящих в систему. Например, при создании программы развития фирмы необходимо

учитывать цели таких групп людей, как акционеры, работники по найму, покупатели, поставщики, а также интересы вышестоящих и подведомственных организаций. Игнорирование целей и требований заинтересованных сторон может привести к тому, что они будут препятствовать реализации принятых решений. **3. Взаимовлияние целей.** Множественность целей приводит к необходимости учитывать их взаимное влияние. Взаимоотношения между целями могут быть различными. Во-первых, одни цели могут являться подцелями, т. е. средствами решения других, более общих целей. Выявление и формулировка подчиненных целей — весьма эффективный способ поиска средств достижения исходной цели. Этот подход лежит в основе методологий построения деревьев целей, которые будут рассмотрены ниже (п. 3.3). Во-вторых, цели могут как противоречить друг другу, так и, наоборот, усиливать друг друга, обеспечивать эффект эмерджентности. Так, цель «улучшить условия труда» затрудняет достижение цели «увеличить прибыль», так как ведет к увеличению издержек, а цель «увеличить оборот», наоборот, способствует. В случае конфликтности целей необходимо их согласование, нахождение компромисса, установление приоритетов. **Выработка решений.** Данный этап является наиболее сложным и «творческим». Необходимо сгенерировать возможные альтернативные варианты достижения целей, выполнить сравнение и оценку вариантов и выбрать оптимальный вариант, обеспечивающий наилучшие значения критериев и удовлетворяющий ограничениям. Наибольшую трудность представляет *генерирование альтернатив*. Используются различные подходы. Это может быть логический поиск, в частности выстраивание причинно-следственных цепочек, связывающих решения с целями. Данный подход используется в методологиях деревьев целей, анализа иерархий и др.

Для формирования вариантов могут использоваться методы композиции, например, метод морфологического анализа. При этом в качестве комбинируемых признаков выбираются атрибуты системы, однозначно определяющие способ ее реализации. Например, если речь идет о некотором техно-логическом процессе, то это могут быть параметры, характеризующие технологию, используемые технические средства и материалы, исполнителей, способы управления, время и место выполнения процесса и т. д. Комбинируя различные значения параметров, можно получить множество вариантов организации процесса. Используются также методы активизации мышления, позволяющие экспертам формировать новые неожиданные решения, которые невозможно сгенерировать комбинаторными или логическими методами. Ряд подобных методов рассмотрен ниже. Детальная проработка каждого из сформированных альтернативных вариантов может осуществляться с помощью методов той предметной области, к которой

принадлежит проблемосодержащая система. В случае сложных систем синтез, как и анализ, может осуществляться на разных уровнях абстрагирования, т. е. для каждого варианта реализации системы может быть построена иерархическая модель. Варианты могут быть описаны на разных языках конфигуратора. Наибольшую сложность при этом составляет согласование вариантов, описанных на различных языках. Для *оценки альтернатив и выбора оптимальных вариантов* существует множество методов — от формальных (например, методов математического программирования, методов исследования операций) до экспертных. В случае, когда выбор осуществляется не одним лицом, а группой лиц, возникает проблема согласования индивидуальных предпочтений. Для ее решения разработаны различные методы группового выбора — принцип де Кондорсе, принцип Курно, принцип Парето и др. [2].

При поиске решений для сложных систем возникают вопросы, связанные с *иерархическим принятием решений*. Необходимо увязать решения, принятые для отдельных подсистем, друг с другом и с целями системы в целом. Локальные оптимальные решения не всегда обеспечивают достижение глобального оптимума. Ситуация еще более усложняется, если объектом является социальная, организационная система, так как у отдельных людей и групп, входящих в систему, имеются собственные цели, которые могут противоречить общим целям системы. При выработке решений приходится согласовывать локальные и глобальные цели. Существуют различные подходы к решению задач координации. Используют три основных стратегии: восходящую, нисходящую и смешанную. *Восходящая* стратегия предполагает прохождение иерархии подсистем снизу вверх. Для каждой подсистемы нижнего уровня выбирается оптимальный вариант. Затем происходит согласование выбранных вариантов и их агрегация в варианты вышестоящих подсистем. Полученные агрегированные варианты также обобщаются до тех пор, пока не будет сформирован вариант всей системы в целом. Недостаток данной стратегии состоит в том, что при выборе вариантов учитываются только локальные критерии эффективности и результирующее решение может быть слишком далеко от глобального оптимума. При использовании *нисходящей* стратегии сначала выбирается оптимальный обобщенный вариант всей системы в целом. Затем осуществляется выбор оптимальных вариантов для подсистем второго уровня с учетом выбранного варианта первого уровня. Аналогичным образом выбираются варианты следующих уровней. Основным недостатком данной стратегии является то, что на верхнем уровне может быть выбран нереализуемый обобщенный вариант, для которого не удается найти варианты подсистем, удовлетворяющие ограничениям, накладываемым этим вариантом.

Более гибкой является *смешанная* стратегия, в соответствии с которой происходит прохождение иерархии «сверху вниз с возвратом». В случае если для какой-либо подсистемы не удастся найти вариант, удовлетворяющий ограничениям материнской подсистемы, осуществляется возврат на предыдущий уровень и выбирается вариант, накладывающий менее жесткие ограничения на дочерние подсистемы. Если этот, более «мягкий», вариант материнской системы нарушает ограничения подуровня, в который она входит, то осуществляется переход к еще более высокому уровню с тем, чтобы «ослабить» ограничения подуровня и т. д.

**Реализация решений и оценивание результатов.** Данный этап начинается с организации выполнения принятых решений. Это не менее важная часть проекта, чем выработка решений. Необходимо разработать обеспечивающие комплексы. Результатом создания нормативно-правового обеспечения являются документы, которые создадут правовую основу для внедрения решений. Создание организационного обеспечения заключается в разработке системы управления реализацией проекта. В ходе создания финансового обеспечения выявляется потребность в финансовых ресурсах, определяются источники их покрытия, разрабатывается инвестиционный план. Следует разработать план мероприятий по внедрению решений с учетом имеющихся ресурсов и сроков внедрения. В ходе его разработки требуется: распределить весь процесс на этапы; распределить обязанности (ответственность) и назначить исполнителей на каждом этапе; определить состав и количество необходимых ресурсов; распределить ресурсы по этапам; установить даты начала и завершения каждого этапа, принимая в расчет их согласованность между собой и возможность поступления ресурсов. Немаловажной частью подготовки к реализации плана работ является выявление потенциальных рисков, составляющих угрозу его срыва или ненадлежащего выполнения. Управление рисками включает в себя: идентификацию предполагаемых рисков (технических, правовых, организационных и т. д.); оценку рисков по критериям вероятности и значимости; классификацию по степени терпимости; разработку мер по снижению или нейтрализации рисков. В ходе реализации разработанной программы мероприятий необходимо осуществлять мониторинг с тем, чтобы в случае отклонения от плана, вовремя внести коррективы. По окончании выполнения программы необходимо дать оценку последствий ее реализации.

Рассмотренная базовая методология системного анализа не накладывает никаких ограничений на используемые методы и модели. На ее базе разрабатываются различные прикладные методологии, в основе которых лежит некоторая модель предметной области, вокруг которой и организуется весь процесс системного анализа. Прикладные методологии более детальны и конкретны по сравнению с базовой, однако, как правило,

они охватывают не все этапы системной последовательности, акцентируя внимание лишь на некоторых. Все прикладные методологии можно условно разделить на две группы: структурного анализа и логического анализа. Ниже будут рассмотрены наиболее яркие представители обеих групп методологий.

**Мозговая атака (мозговой шторм)** представляет собой групповое обсуждение с целью получения новых идей, вариантов решений проблемы. Характерная особенность этого метода – использование в трудных тупиковых ситуациях, когда известные пути и способы решения оказываются непригодными. Суть метода состоит в том, что при коллективном поиске решения некоторой задачи в условиях благоприятного для творчества микроклимата происходит как бы цепная реакция идей, приводящая к интеллектуальному взрыву.

При использовании метода мозговой атаки целесообразно использовать следующие принципы:

- сознательное генерирование как можно большего количества вариантов. Предпочтение отдается количеству идей, а не качеству (идеи высказываются кратко без обсуждения);
- запрет критики любой идеи, какой бы дикой она ни казалась. Не рекомендуется отбрасывать альтернативы, кажущиеся, на первый взгляд, абсурдными, надуманными;
- предпочтительное использование не систематического логического мышления, а фантазии, ассоциаций, образного мышления;
- комбинирование или усовершенствование идей, предложенных участниками мозговой атаки.

**Методологии построения дерева целей** Идея метода дерева целей состоит в декомпозиции глобальной цели системы на отдельные подцели, достижение которых обеспечивает достижение глобальной цели. Подцели в свою очередь могут разбиваться на более мелкие подцели и т. д. Процесс заканчивается, если подцели нижнего уровня могут считаться элементарными, т. е. способ их достижения достаточно очевиден. Несмотря на простоту концепции построения дерева целей, при его формировании возникают большие трудности, связанные с декомпозицией. Процедура формирования иерархии целей в значительной мере является процессом эвристическим и мало формализованным. Для облегчения данного процесса было предложено использовать типовые основания декомпозиции. На рис. 1.7 представлена обобщенная схема построения дерева целей с

использованием типовых оснований (детальная блок-схема алгоритма построения дерева приведена в [2]).

1. Определение области анализа. Формулируется глобальная цель в виде некоторого высказывания, подлежащего анализу. От правильности формулировки во многом зависит, получим ли мы в результате анализа то, что хотели.

2. Определение целевой системы (точки зрения), в интересах которой выполняется весь анализ. Этот блок определяет, зачем нужно то, что мы будем делать [2].

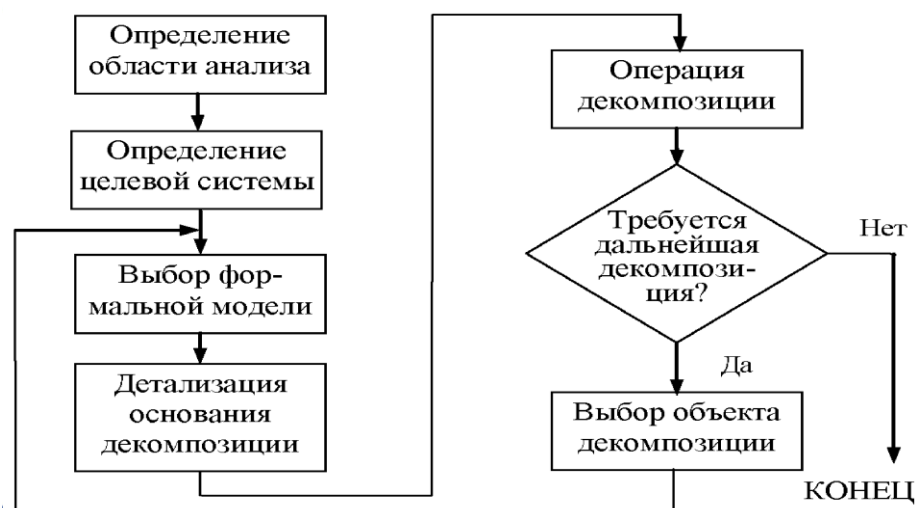


Рис.1.7. Обобщенная схема построения дерева целей

3. Выбор формальной модели. Из набора типовых оснований декомпозиции, являющихся формальными моделями системы, эксперт выбирает наиболее подходящее основание. Примеры формальных моделей: «Жизненный цикл», «Структурные элементы деятельности», «Управленческий цикл». Нужно уточнить, что система, с которой связан объект анализа, и система, по модели которой проводится декомпозиция, необязательно совпадают. Например, одна из этих систем может являться подсистемой или надсистемой для другой [2].

4. Детализация основания декомпозиции. Формальную модель необходимо наполнить содержанием с учетом выбранной области анализа и целевой системы. Например, необходимо конкретизировать этапы жизненного цикла производства продукта или цикла управления, составить конкретные классификаторы структурных элементов для рассматриваемого вида деятельности.

5. Операция декомпозиции. Для каждой подсистемы, выделяемой в соответствии с выбранным основанием декомпозиции, формулируется подцель, связанная с данной подсистемой и обеспечивающая достижение декомпозируемой цели. 6. Проверка.



Полученные подцели нижнего уровня про-веряются на элементарность. Если все «листья» дерева мож-но считать элементарными (простыми, понятными, реализуемыми), то построение дерева целей заканчивается. 7. Выбор объекта декомпозиции. Выбирается одна из подцелей, нуждающихся в дальнейшей декомпозиции (из мно-жества неэлементарных подцелей), и осуществляется переход на шаг 3. Итеративность приведенного алгоритма придает ему ва-риабельность, возможность пользоваться моделями различ-ной детальности на разных ветвях, углублять детализацию сколь угодно [2].

**Принцип итеративности:** схема применения этапов системного анализа должна быть итеративной. Данный принцип выдвигается исходя из требования гиб-кости регламента. Общий регламент, безусловно, должен соответствовать системной последовательности принятия решений, включающей в себя этапы анализа, постановки целей, выработки решений, реализации и оценки. При этом для от-дельных классов систем могут быть предложены адаптиро-ванные к конкретной предметной области и более подробные последовательности этапов. Однако схема применения этапов, определяющая порядок их следования, не может быть жесткой, она должна быть итеративной — по типу спиральной схемы или макетной (схемы быстрого прототипирования). Необходимость итеративного регламента, допускающего возмоз-ность возврата на предыдущие этапы и корректировки ранее принятых решений, обусловлена сложностью и многоаспект-ностью работ, выполняемых в процессе разработки проблемо-разрешающей системы. На рис. 4.6 представлена итеративная схема выполнения системного анализа.

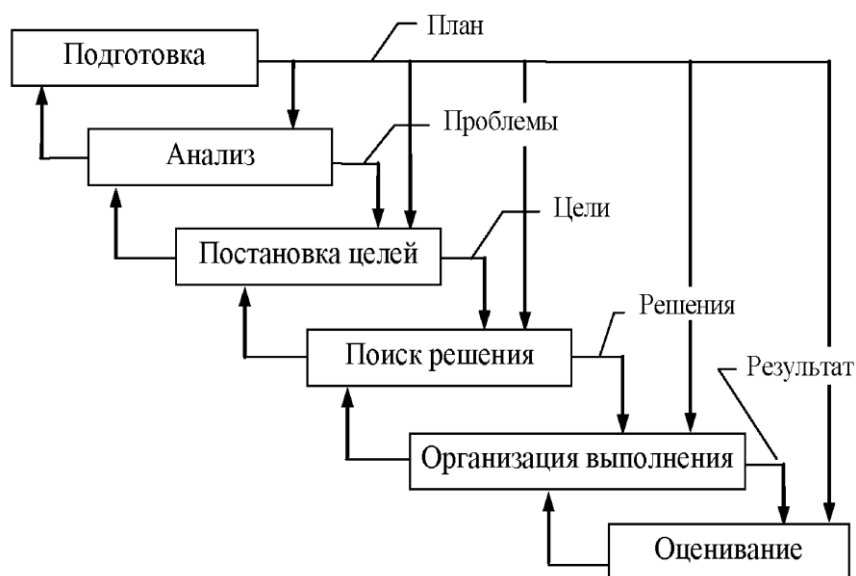


Рис. 1.8. Схема взаимосвязей этапов системного анализа

Принцип итеративности может быть распространен и на выполнение циклов принятия решений применительно к под-системам на разных уровнях стратифицированной

иерархии. Необходимо обеспечить возможность возврата к предыдущим уровням, т. е. выполнения итераций между принятием решений на различных уровнях с целью лучшего согласования локальных целей и решений между собой и глобальной целью.

**Жизненный цикл управления информационными ресурсами**

Исследование процессов создания, распространения, обработки и использования информации внутри предприятия занимается специальная научная дисциплина — Knowledge Management (KM), или управление знаниями. В литературе по данной тематике встречаются различные, хотя во многом и похожие, описания жизненного цикла знаний. Можно выделить три укрупненных стадии (рис.1. 9).

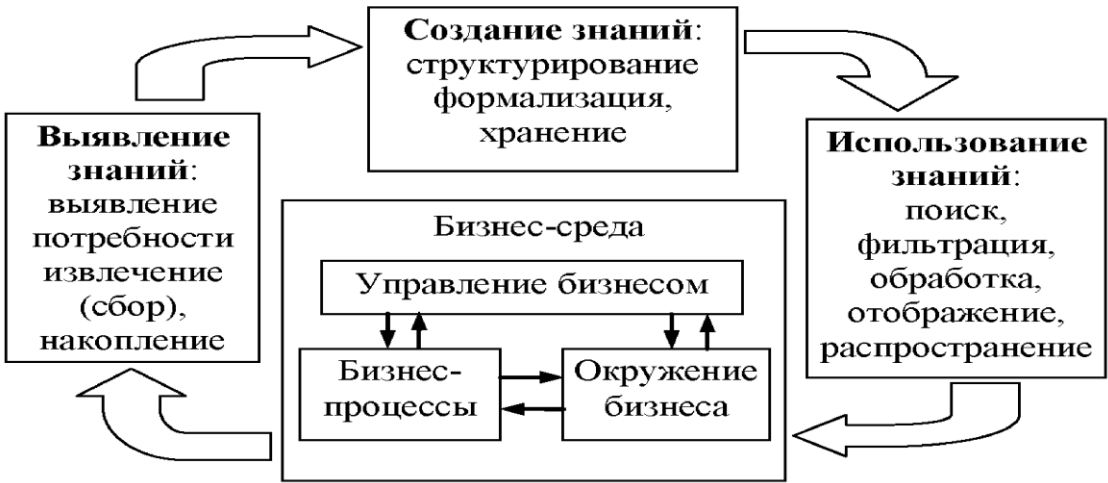


Рис.1. 9. Жизненный цикл знаний

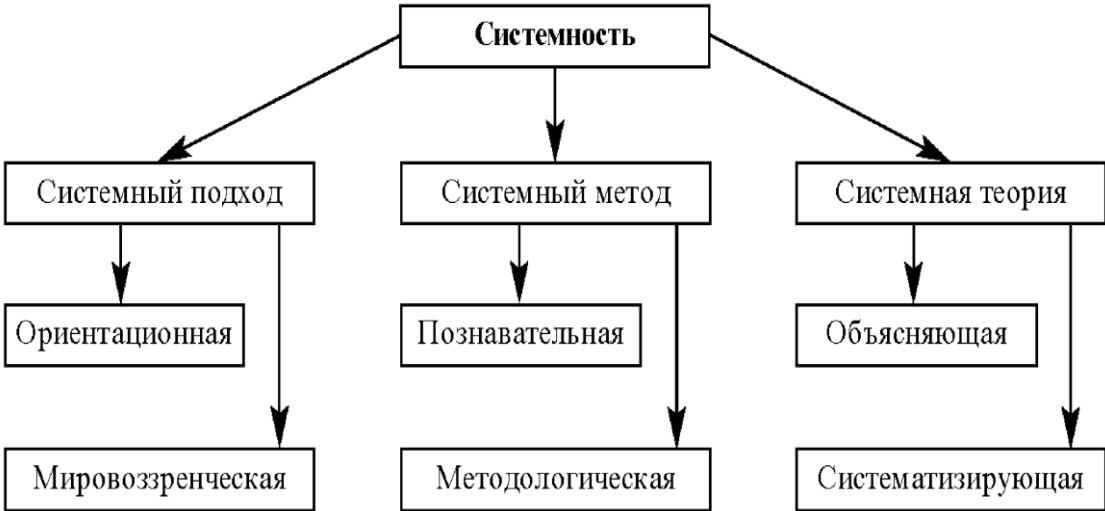


Рис. 1.10. Структура системности и составляющие ее функции

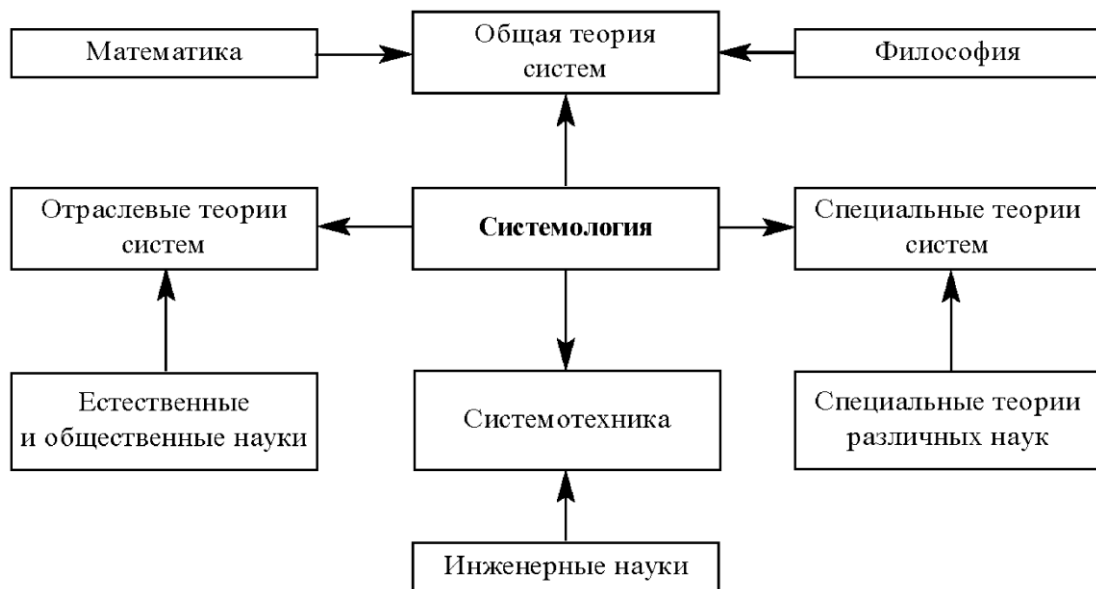


Рис. 1.11. Структура системологии

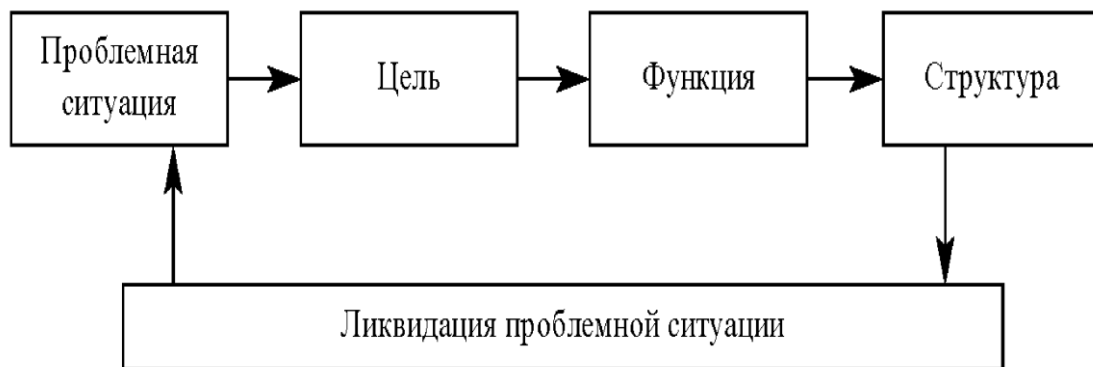


Рис. 1.12. Конструирование системы

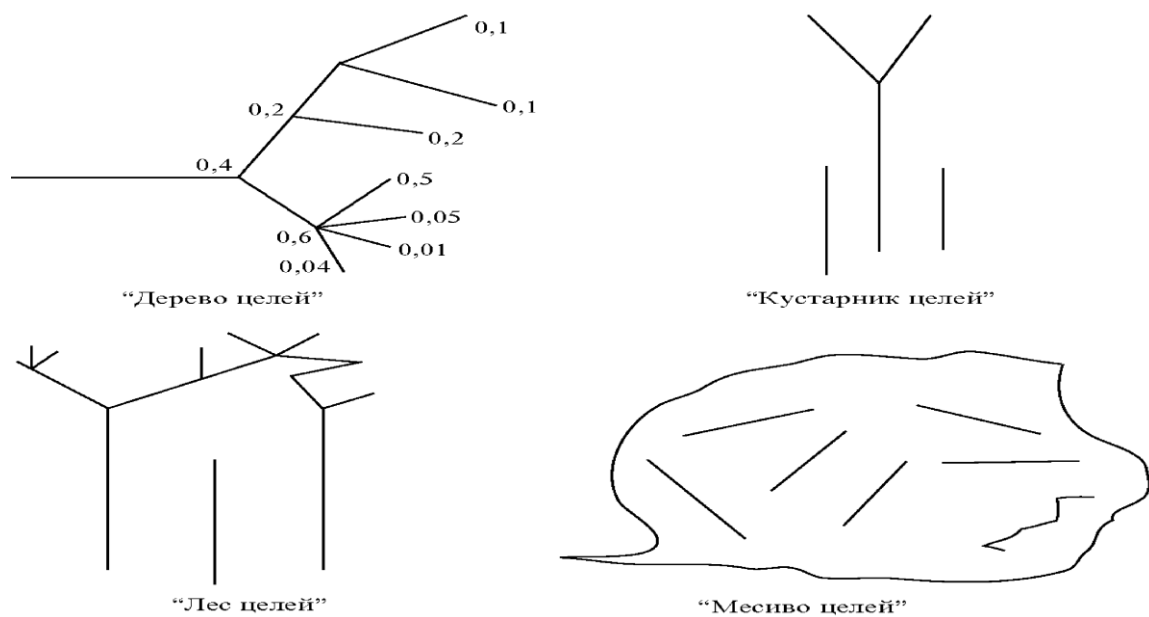


Рис. 1.13. Варианты целевых характеристик системы

**Оперативные функции системы** связаны с выбором способа деятельности, воздействия на окружающую среду. Здесь могут применяться стратегии поведения:

- **минимаксная** — это ориентир на неблагоприятную ситуацию. Но результат не может быть хуже, чем по замыслу. Минимаксная стратегия гарантирует: лучше — может быть, хуже — нет;

- **минимума среднего риска** — преимущество в высокой эффективности в среднем. Основной недостаток — трудность определения среднего риска;

- **допустимого риска** — допускается относительно высокий риск и ищется способ поведения, при котором успех будет максимальным. Основной недостаток — трудность определения размера допустимого риска.

**Под функцией системы обычно понимают:**

- действие системы, ее реакция на среду;

- множество состояний выходов системы;

- при описательном или дескриптивном подходе к функции она выступает как свойство системы, которое разворачивается в динамике;

- как процесс достижения цели системой;

- как согласованные между элементами действия в аспекте реализации системы как целого;

траекторию движения системы, которая может описываться математической зависимостью, формулой, связывающей зависимые и независимые переменные системы.

**Внешние и внутренние функции**

**Внешние функции** — это активные, направленные воздействия системы на окружающую среду для достижения поставленных целей. Внешние функции обеспечивают внешние результаты системы. Они представляют собой устойчивые реакции системы на среду и устойчивые связи системы со средой. Поэтому для них характерны:

- **устойчивость и стабильность, когда система постоянно проявляет себя;**
- **направленность, т.е. функция обязательно на что-то направлена, предметна;**
- **взаимодействие со средой, поскольку функция не сводится только к воздействию на среду;**

• **активность и целенаправленность, ибо функционирование проявление активности системы в достижении цели.**

**Под внутренней функцией** следует понимать важнейшее условие внешнего функционирования, при котором проявление целого обеспечивается проявлением и

существованием его частей, т.е. это способ взаимодействия частей внутри целого.

Разновидности внутренних функций:

- распорядительная, т.е. закрепление за элементами и подсистемами определенных действий;
- координации и согласования, благодаря которым происходят совместные действия элементов;
- субординации или соподчинения, предполагающие распределение между элементами координационных или субординационных отношений;
- контролирующая, т.е. осуществляющая проверку соответствия действия определенной норме;
- целеполагающая, т.е. определяющая цели функционирования и развития системы,

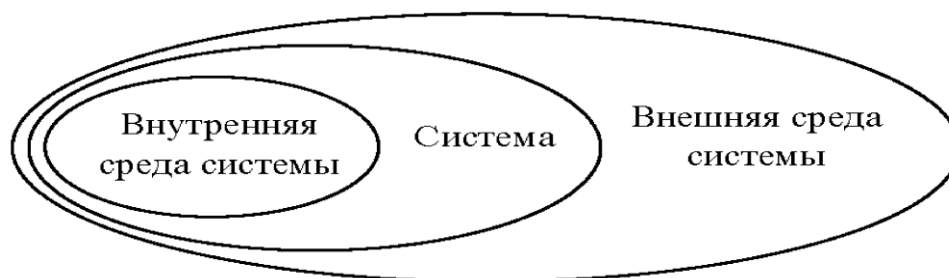


Рис. 1.14. Внутренняя и внешняя среда системы

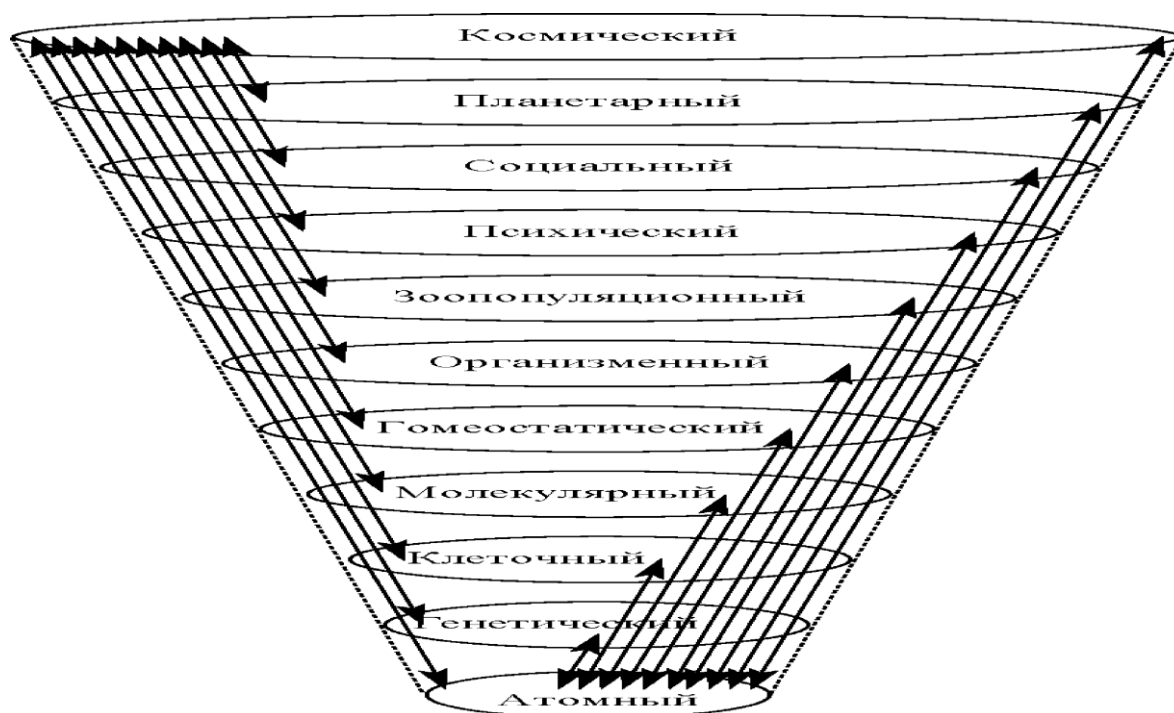


Рис.1.15.Уровни иерархии систем

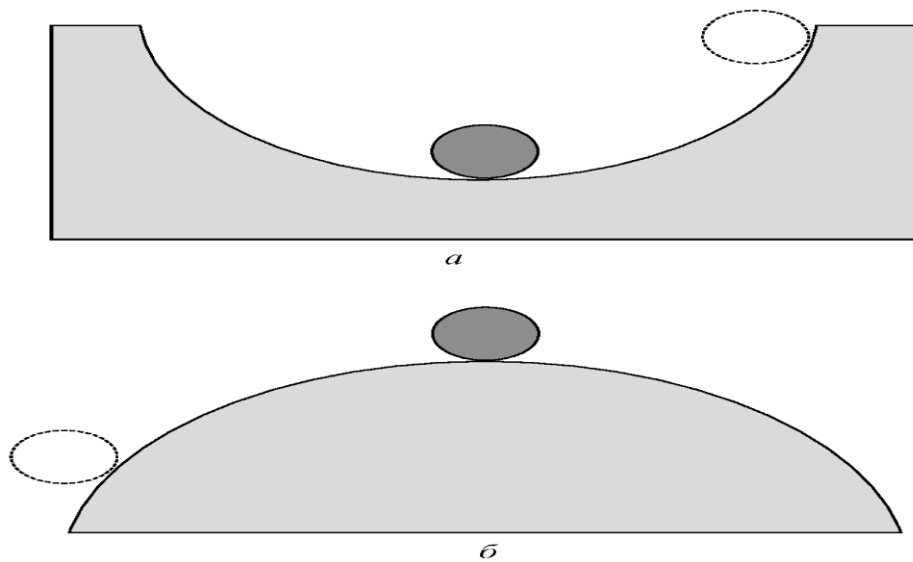


Рис. 1.16. Модели устойчивой (а) и неустойчивой системы (б).

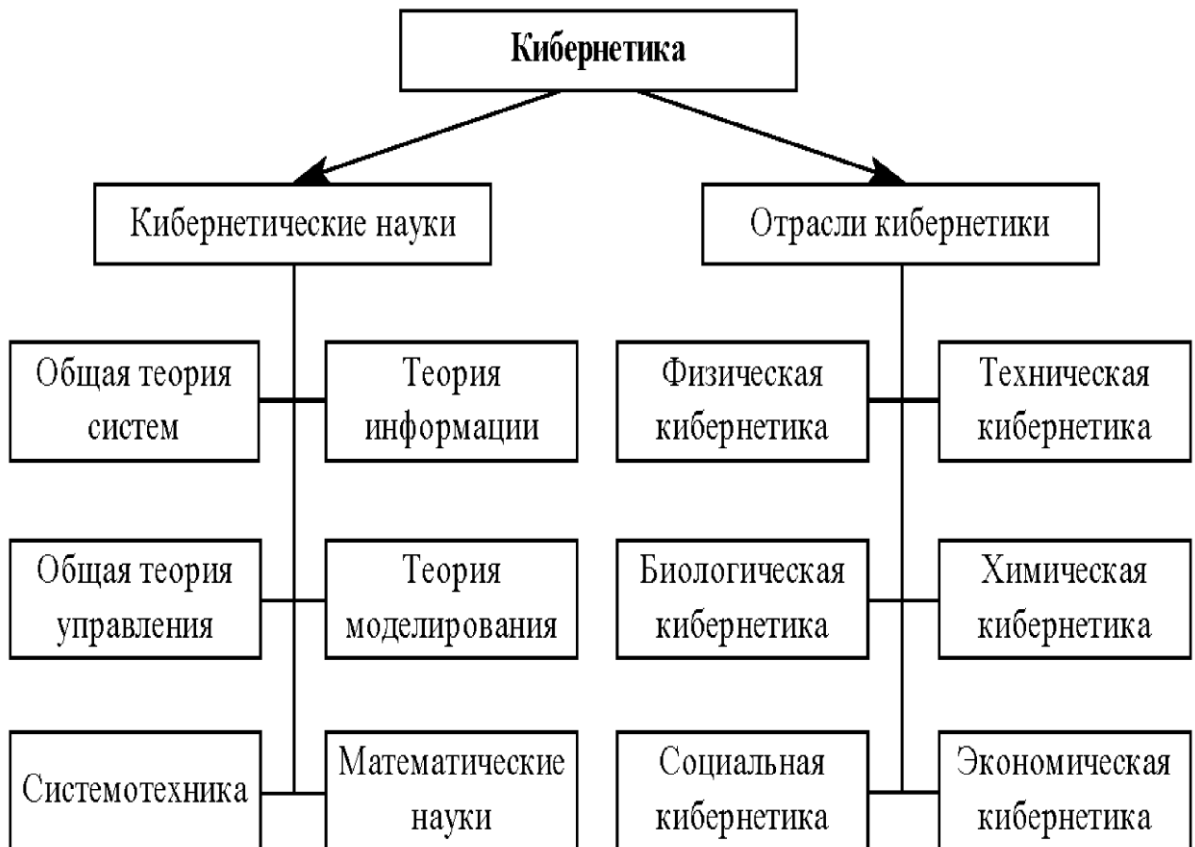


Рис. 1.17. Структура Кибернетики

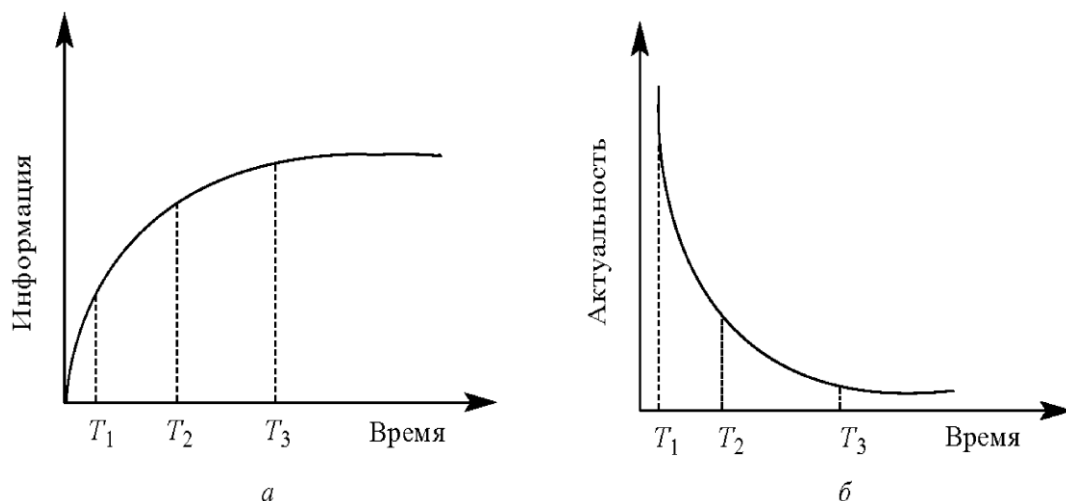


Рис.1.18. Зависимость принятия решений от времени накопления информации (а) и их актуальности (б)

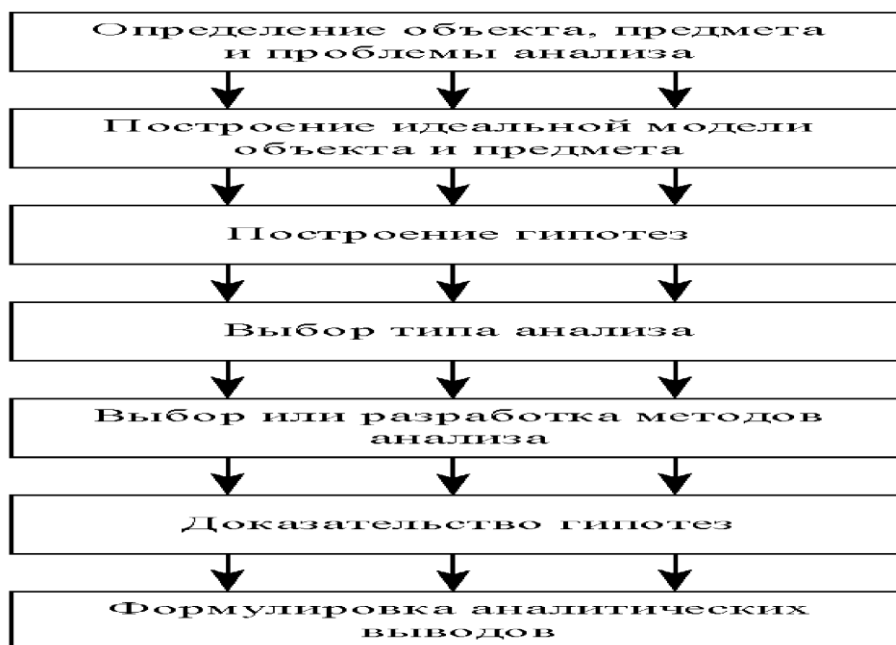


Рис. 1.19. Универсальная технология анализа

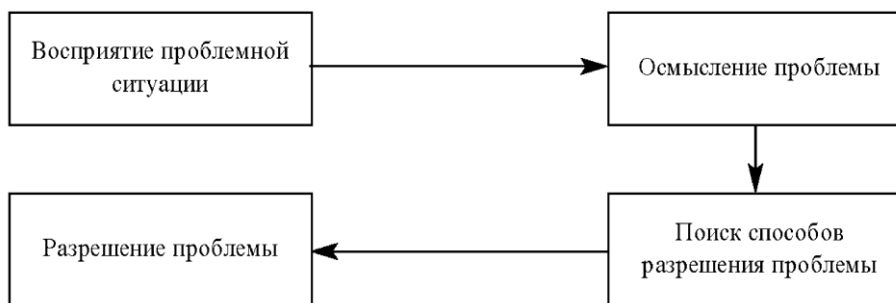


Рис. 1.20. Этапы деятельности в условиях проблемной ситуации

**Полный цикл умственных действий** от возникновения проблемной ситуации до разрешения проблемы имеет несколько этапов:

- возникновение проблемной ситуации;
- осознание сущности затруднения и постановка проблемы;
- нахождение способа решения путем догадки или выдвижения предположений и обоснование гипотезы;
- доказательство гипотезы;
- проверка правильности разрешения проблем.

Технология проблемного анализа предполагает аналитическую работу с классификацией проблем по следующим направлениям:

определение формулировки проблемы как неудовлетворенной общественной потребности;

#### **Виды системной деятельности и их характеристика**

<b>Виды деятельности</b>	<b>Цель деятельности</b>	<b>Средства деятельности</b>	<b>Содержание деятельности</b>
Системное познание	Получение знания	Знания, методы познания	Изучение объекта и его пред-мета
Системный анализ	Понимание проблемы	Инф ормация, методы ее анализа	Рассмотрение проблемы пос-редством методов анализа
Системное моделирование	Создание модели системы	Методы моделирования	Построение формальной или натурной модели системы
Системное конструирование	Создание системы	Методы конструирования	Проектирование и опредме-чивание системы
Системная диагностика	Диагноз системы	Методы диагностики	Выяснение отклонений от нормы в структуре и функциях системы
Системная оценка	Оценка системы	Теория и методы оценки	Получение оценки системы, ее значимости



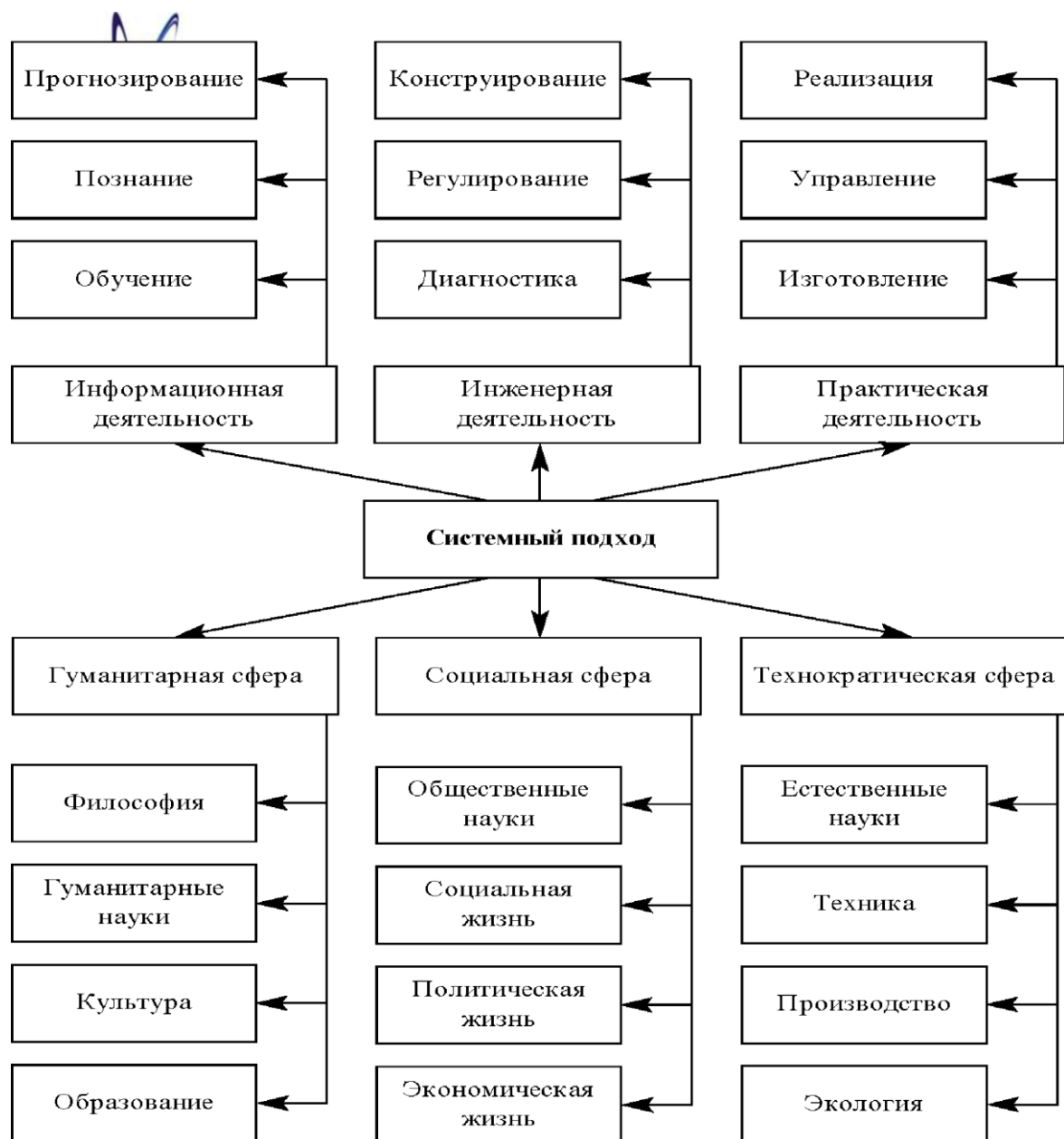


Рис. 1.21. Системный подход в практическом жизни общества

## 2. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 2.1 Критерии эффективности систем передачи информации

В зависимости от назначения и условий функционирования системы радиосвязи ее эффективность оценивается на основании тех или иных показателей (критериев), основными из которых являются энергетический и спектральный. Соответственно, важнейшими характеристиками любой системы радиосвязи являются энергетическая и спектральная эффективность, характеризующие, соответственно, энергетические затраты и полосу занимаемых частот, необходимые для передачи сообщений.

К сожалению, одновременное достижение предельных значений этих показателей эффективности оказывается невозможным, так что в каждом конкретном случае построения системы радиосвязи приходится руководствоваться компромиссными соображениями при оптимизации характеристик и режимов функционирования системы [1-4].

Эффективные методы модуляции и помехоустойчивого кодирования все шире используются в современных цифровых телекоммуникационных системах (ТКС). Переход в ТКС к ансамблям многопозиционных сигналов увеличивает информационную скорость и обеспечивает передачу больших потоков информации. Современная элементная база позволяет применять в ТКС достаточно сложные методы помехоустойчивого кодирования и обеспечивать тем самым высокую верность передачи информации. Исследованию методов модуляции и кодирования в ТКС посвящена обширная литература, отражающая как достижения теории, так и вопросы ее практических приложений [1-18].

Как известно, теория сигналов и теория кодирования длительное время развивались независимо. В последние годы значительно возрос интерес к новому перспективному направлению, возникшему на стыке этих наук. В работах отечественных и зарубежных авторов интенсивно исследуются возможности ТКС, в которых для передачи информации используются ансамбли многопозиционных сигналов в сочетании с помехоустойчивыми кодами, причем, процедуры модуляции/кодирования (демодуляции/декодирования) осуществляются *совместно*. При рациональном построении такие *сигнально-кодовые конструкции* (СКК) сочетают в себе положительные качества как многопозиционных ансамблей сигналов, так и помехоустойчивых кодов, допускают достаточно простые и реализуемые на практике алгоритмы декодирования и при использовании их в ТКС позволяют существенно продвинуться к теоретическим пределам эффективности. Вопросы синтеза таких систем модуляции/кодирования, анализа их структуры, помехоустойчивости и эффективности, демодуляции/декодирования составляют основное

содержание нового перспективного направления в теории связи - *теории сигнально-кодовых конструкций*.

Один путь базируется на введенном А.Г. Зюко [1, 2] понятии эффективности систем связи. Анализ и сравнение эффективности систем с многопозиционными сигналами и систем с корректирующими кодами приводит в *информационной теории СКК* к идее *их комбинации в единой сигнально-кодовой конструкции*. Такой путь является наглядным, убедительным и излагается без строгих математических выкладок. Этот путь может быть использован для популярного изложения оснований теории СКК [1-4].

Статистическая теория связи предлагает большое количество вариантов построения телекоммуникационных систем. Как из этого множества выбрать вариант, наиболее целесообразный в заданных условиях? По каким критериям следует производить этот выбор? Насколько оправдано применение тех или иных новых систем и как совершенствовать существующие системы? Принципиальное решение этих вопросов в конечном итоге сводится к *оптимизации систем связи по критериям эффективности*.

Типовая структура одноканальной системы передачи дискретной информации (СПДИ) приведена на рис. 1.1. Источник вырабатывает сообщения, которые необходимо передавать по каналу СПДИ. Это могут быть последовательности *дискретных* сообщений (данные, телеграфные сообщения и т.д.) либо *непрерывные* сообщения (речь, телевидение, результаты телеизмерений и др.), преобразованные в *цифровую форму*.

Реальные сообщения содержат *избыточность* и для согласования источника с каналом передачи информации используют *кодер источника*. Совместно с *декодером* они образуют *кодек источника*. Методы кодирования источника изложены в работах [2, 3, 7, 9-11, 13-16, 18 ].

Основные требования к СПДИ формулируются достаточно просто:

- ***верность,***
- ***скорость,***
- ***своевременность доставки информации от отправителя к получателю.***

В системах без помехоустойчивого кодирования верность и скорость зависят от вида используемых сигналов-переносчиков. Применение помехоустойчивого кодирования позволяет повысить верность передачи, но за счет снижения скорости. С другой стороны, выбором сигналов можно добиться повышения скорости передачи информации, но, зачастую, в ущерб верности передачи. Однако, следует учитывать, что применение корректирующих кодов вносит задержку в передачу цифровых данных, что ухудшает такой показатель, как своевременность доставки информации. В каждом конкретном

случае телекоммуникационных систем (ТКС) могут быть сформулированы количественные выражения этих требований. Это зависит от назначения ТКС и вида передаваемого сообщения. В общем случае показатели верности, скорости и своевременности передачи информации находятся в противоречивых соотношениях.

Кроме отмеченных выше, следует упомянуть о *дополнительных требованиях*, которые определяют применение того или иного метода передачи информации:

**Спектральная эффективность.** Современные ТКС работают в условиях дефицита частотного спектра, отводимого для передачи информации. Это и обуславливает важность методов формирования *компактных спектров сигналов*, передаваемых по линиям связи с ограниченной полосой частот.

**Сложность реализации методов модуляции-кодирования.** Теория информации указывает путь повышения помехоустойчивости - использование для передачи *длинных последовательностей сигналов и кодов*, для извлечения информации из которых на приемной стороне приходится применять достаточно сложные алгоритмы обработки. Поэтому *конструктивная теория кодирования* направлена на поиск корректирующих кодов, допускающих реализуемые алгоритмы декодирования [4].

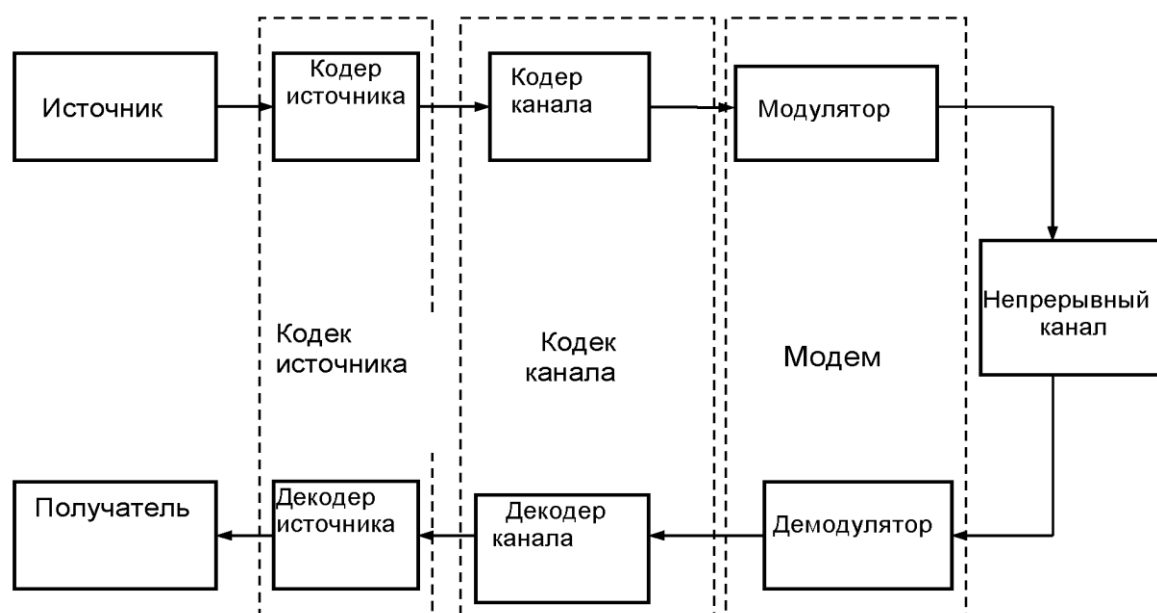


Рис. 2.1. Структурная схема СПДИ

Согласно известным теорем К. Шеннона, в принципе *возможно сколь угодно большое повышение верности передачи информации*, если скорость передачи по каналу  $R_{кан}$  не превышает пропускной способности канала  $C_K$ . Достигается это применением достаточно длинных *корректирующих кодов* (КК). С этой целью в структуру КК вводится *избыточность*.

*Кодек КК (кодер и декодер канала)* показан на рис. 1.1. В реальных условиях длина кода ограничена допустимой сложностью устройств кодирования и, прежде всего, декодирования, поэтому эффект от применения корректирующих кодов зависит от параметров кода и ограничений на реализацию кодека канала.

Современная теория предлагает широкий набор корректирующих кодов, различных по структуре, принципам построения и корректирующей способности. *Кодем СКК* включает в себя сочетание кодека/модулятора и, соответственно, демодулятора/декодера.

В общем случае результат работы системы связи определяется количеством и качеством передаваемой информации. Количество оценивается скоростью передачи информации по каналу (бит/с), а качество - величиной ошибки. Согласно теоремам К. Шеннона, ошибка при соответствующем выборе метода передачи (модуляции/кодирования) может быть сделана произвольно малой. В то же время, скорость передачи не может быть выше некоторого информационного ресурса, называемого *пропускной способностью канала С*.

В работе А.Г. Зюко [2] было предложено считать одним из показателей эффективности системы величину средней скорости  $R_{кан}$  при которой обеспечивается заданная верность передачи информации. При этом могут быть определены следующие *показатели эффективности*:

- ***Информационная эффективность системы, определяющая степень использования пропускной способности канала относительной величиной***

$$\eta = \frac{R_{кан}}{C} \quad (2.1)$$

В реальных условиях показатель  $\eta$  всегда меньше единицы. Чем ближе  $\eta$  к единице, тем совершеннее система передачи информации. Достижение необходимых скорости и верности передачи сопровождается определенными затратами других важнейших ресурсов: *мощности сигнала  $P_c$  и полосы частот канала  $F_k$* . Такой подход позволил ввести показатели эффективности использования ресурсов системы, а именно:

- ***Энергетическая эффективность***

$$\beta = \frac{R_{кан}}{P_c / N_0} \quad (2.2)$$

где  $N_0$  - спектральная плотность мощности шума;

- ***Частотная эффективность***

$$\gamma = \frac{R_{\text{кан}}}{F} \quad (2.3)$$

где  $F$  - полоса частот канала.

Показатели  $\beta$  и  $\gamma$  имеют смысл удельных скоростей, а обратные величины  $\beta' = 1/\beta$  и  $\gamma' = 1/\gamma$  определяют *удельные расходы соответствующих ресурсов* на передачу информации с единичной скоростью (1 бит/с).

Для гауссовского канала с полосой  $F$ , отношением мощностей сигнала и шума  $\rho = \frac{P_c}{P_{ш}}$  и пропускной способностью  $C = F \log_2(1 + \rho)$  была установлена связь между показателями эффективности

$$\eta = \frac{\gamma}{\log_2(1 + \frac{\gamma}{\beta})} \quad \text{и} \quad \gamma = \rho\beta$$

Для идеальной системы ( $\eta$ ) определена также предельная зависимость

$$\beta = \frac{\gamma}{2^\gamma - 1}.$$

(2.5)

Зависимость энергетической эффективности от удельной скорости удобно представить в виде кривой на плоскости  $\beta\gamma$  (рис. 1.2). Она отражает наилучший обмен между  $\beta$  и  $\gamma$  в непрерывном канале (НК-предел Шеннона). При этом частотная эффективность  $\gamma$  изменяется в пределах от 0 до  $\infty$  то время как энергетическая эффективность ограничена сверху, поскольку

$$\beta_{\max} = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \beta = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\gamma}{2^\gamma - 1} = \frac{1}{\ln 2} \approx 1,443(1,59 \text{ дБ})$$

(2.6)

Аналогичные предельные кривые могут быть построены для других типов каналов [2] (ДНК-дискретно-непрерывный канал, ДСК-дискретный симметричный канал на рис. 2.2).

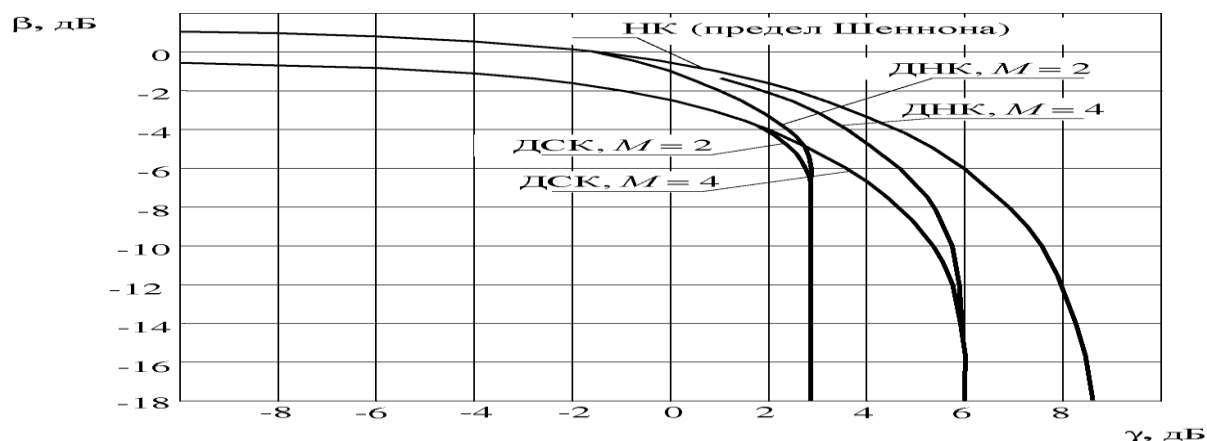


Рис. 2.2. Кривые предельной эффективности систем связи

Полосу частот, занимаемую сигналом конечной длительности не всегда можно определить однозначно. Поэтому далее для анализа и сравнения эффективности будем рассматривать следующую модель процесса передачи информации.

Полагаем, что на интервале  $T$  по каналу передается определенное количество независимых отсчетов  $N_T$  (по В. А. Котельникову  $N_T = 2FT$ ).

Тогда  $D = \frac{N_T}{T}$  число передаваемых отсчетов в единицу времени.

В этой модели могут быть определены следующие показатели:

- **Удельная скорость передачи информации**

$$RN = R_{\text{кан}} / D \text{ (бит / отсчет)}, \quad (2.7)$$

- **Удельная информационная емкость\* канала**

$$C_N = \frac{C}{D} \text{ (бит / отсчет)}, \quad (2.8)$$

- **Удельная средняя энергия сигнала, затрачиваемая на передачу одного отсчета**

$$EN = P_c / D$$

- **Удельная эффективность использования пропускной способности канал**

$$\eta_N = \frac{R_N}{C_N} = \eta, \quad (2.9)$$

- **Удельная энергетическая эффективность (удельная эффективность использования энергии сигнала)**

$$\beta_N = \frac{R_N}{E_N / N_0} = \beta, \quad (2.10)$$

## *- Удельная скорость передачи информации*

$$\gamma_N = R_N. \quad (2.11)$$

Переход к удельным показателям эффективности означает, что процесс формирования сигналов рассматривается в ортогональном базисе. При этом удельные показатели эффективности (1.9) и (1.10) точно совпадают с каноническими (1.4), (1.5), но удается избежать неопределенности при оценке полосы частот [1, 2].

### **2.2. Сигнально-кодовые конструкции в системах передачи информации**

В цифровых системах связи обычно повышают скорость передачи данных путем уменьшения энергетической емкости бита, т.е. количества энергии сигнала, приходящейся на один бит информации. Но чем меньше энергия, тем больше вероятность того, что бит будет искажен в канале при передаче. Поэтому при повышении скорости передачи разработчики всегда сталкиваются со снижением уровня помехоустойчивости.

Для повышения помехоустойчивости канала передачи данных в цифровых системах применяются коды, исправляющие ошибки. Однако действие таких кодов не всегда эффективно, так как снижается скорость передачи данных.

Треллис-модуляция (TCM – Trellis Coded Modulation) представляет собой способ, который позволяет обеспечить повысить скорость передачи сообщения с сохранением уровня помехоустойчивости. Этот способ отличается тем, что помехоустойчивое кодирование и тип модуляции используются совместно. Выбранная соответствующим образом пара помехоустойчивый код – способ модуляции часто также носит название сигнально-кодовая конструкция (СКК).

В данной работе описан способ включения сверточного кодера, используемого для передачи данных с помощью радиорелейных систем связи, в режим треллис-модуляции. Такой способ повышает скорость передачи в два раза при сохранении уровня помехоустойчивости.

В цифровых системах связи обычно повышают скорость передачи данных путем уменьшения энергетической емкости бита, т.е. количества энергии сигнала, приходящейся на один бит информации. Но чем меньше энергия, тем больше вероятность того, что бит будет искажен в канале при передаче. Поэтому при повышении скорости передачи разработчики всегда сталкиваются со снижением уровня помехоустойчивости.

Для повышения помехоустойчивости канала передачи данных в цифровых системах применяются коды, исправляющие ошибки. Однако действие таких кодов не всегда эффективно, так как снижается скорость передачи данных.



Треллис-модуляция (TCM – Trellis Coded Modulation) представляет собой способ, который позволяет обеспечить повысить скорость передачи сообщения с сохранением уровня помехоустойчивости. Этот способ отличается тем, что помехоустойчивое кодирование и тип модуляции используются совместно. Выбранная соответствующим образом пара помехоустойчивый код – способ модуляции часто также носит название сигнально-кодовая конструкция (СКК).

В данной работе описан способ включения сверточного кодека, используемого для передачи данных с помощью радиорелейных систем связи, в режим треллис-модуляции. Такой способ повышает скорость передачи в два раза при сохранении уровня помехоустойчивости.

### **Корректирующие коды**

Наряду с многопозиционными сигналами для повышения эффективности системы электрической связи (СЭС) широко используются помехоустойчивые коды. Применение корректирующих кодов позволяет повысить верность передачи сообщений или при заданной верности повысить энергетическую эффективность системы. Это особенно важно для систем с малой энергетикой, например, систем спутниковой связи.

На практике используются как блочные, так и непрерывные коды. На рис. 4.1 приведены кривые эффективности для циклического кода Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) и для сверточного кода (СК) с декодированием по алгоритму Витерби.

Применение циклического кода позволяет получить энергетический выигрыш  $\Delta\beta = 2...4$  дБ, а сверточного кода  $\Delta\beta = 4...6$  дБ в обмен на снижение частотной эффективности примерно в 2 раза (3 дБ).

Энергетический выигрыш  $\Delta\beta$  от применения помехоустойчивого кодирования тем больше, чем выше требуемая верность передачи. Для непрерывного канала с белым гауссовским шумом при требуемой вероятности ошибки  $10^{-5}$  предельный энергетический выигрыш кодирования по сравнению с ФМн-2 без кодирования при оптимальном когерентном приеме составляет примерно 10 дБ. Расчетные кривые на рис. 9.2 показывают, что применение циклического кода в канале с фазовой манипуляцией (ФМн) или сверточного кода в канале с АФМ позволяет повысить одновременно энергетическую, так и частотную эффективность. Построение таких высокоэффективных систем на основе сигнально-кодовых конструкций ведет к неизбежному увеличению сложности системы. Не пропускная способность, а сложность является ограничивающим фактором при построении высокоэффективных систем. Задача состоит в том, чтобы построить систему, удовлетворяющую высоким показателям эффективности, при

допустимой сложности.

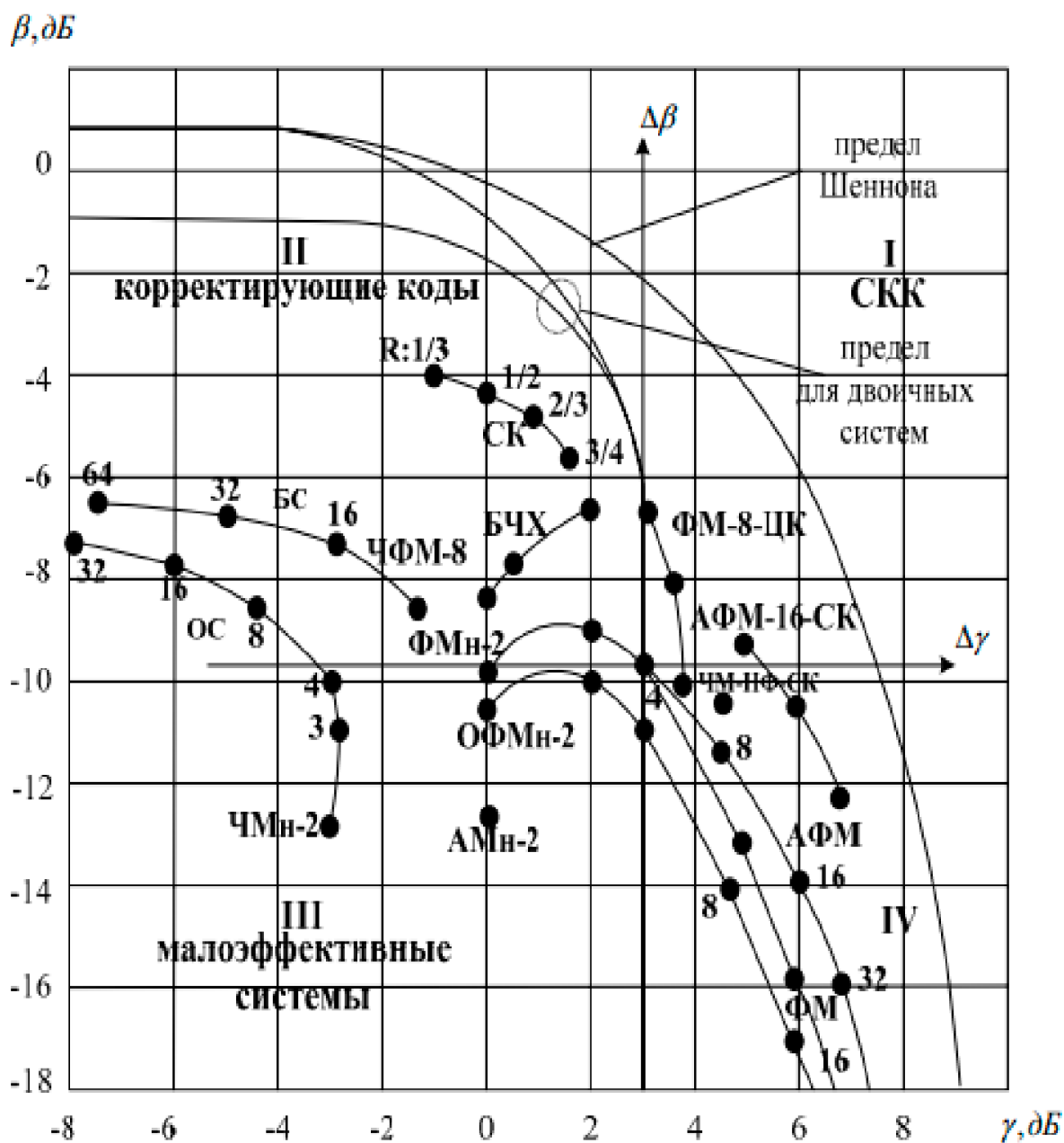


Рис.2.3. Графики зависимости энергетической и частотной эффективности систем связи

При современной элементной базе затраты на реализацию кодирующих и декодирующих устройств значительно сократились. В то же время стоимость энергетики канала практически не изменилась. Таким образом, «цена» выигрыша  $\Delta\beta$  за счет кодирования может быть существенно меньше цены того же выигрыша, полученного за счет увеличения энергетики канала (мощности сиг-

нала или размеров антенн).

Отметим, что выбор способов кодирования и модуляции зависит от характеристик канала. Улучшение этих характеристик, например, путем адаптации к помехам и оценивания искажений сигнала и их последующей компенсации, снижает потери в канале и создает лучшие условия для применения корректирующих кодов.

### **Оптимизация систем связи**

Повышение таких важнейших показателей систем электрической связи, как скорость и верность передачи, связано со значительными частотными и энергетическими затратами. Сравнение между собой различных СЭС осуществляется по степени использования ими основных ресурсов канала связи (пропускной способности, мощности, занимаемой полосы частот), выражаемой через показатели информационной, энергетической и частотной эффективности. Создание СЭС, в которых достигаются близкие к предельным показатели эффективности, требует совместного согласования кодека и модема с учетом статистических свойств непрерывного канала.

### **Согласование методов модуляции и кодирования**

Эффективный путь повышения удельной скорости передачи информации заключается в увеличении числа используемых сигналов  $m$  на интервале  $T$ . Однако увеличение  $m$  приводит к уменьшению расстояния между ближайшими сигналами ансамбля и снижению энергетической эффективности.

При высоких требованиях к верности передачи целесообразным становится применение помехоустойчивых кодов, которые позволяют повысить энергетическую эффективность за счет снижения частотной. Помехоустойчивое кодирование позволяет снизить необходимую величину мощности сигнала, поскольку расстояние между кодовыми комбинациями увеличивается. Одновременное требование большой скорости и верности передачи в условиях ограниченного частотного и энергетического ресурса может быть выполнено при использовании многопозиционных сигналов и помехоустойчивых кодов.

При многопозиционной модуляции, когда по каналам связи передается блок из  $n$  кодовых символов, важно также правильно выбрать манипуляционный код, определяющий правило сопоставления с каждым передаваемым сигналом определенного блока кодовых символов. Общий принцип заключается в том, что большему расстоянию по Хэммингу между кодовыми блоками должно соответствовать большее расстояние по Евклиду между отображающими их сигналами.

Создание СЭС, в которых достигаются близкие к предельным показатели эффективности, требует совместного согласования кодека и модема с учетом

статистических свойств непрерывного канала. Это означает, что кодирование и модуляцию необходимо рассматривать как единый процесс формирования сигнала, а демодуляцию и декодирование – как процесс оптимального приема сигнально-кодového блока в целом.

Согласование модуляции и кодирования сводится к поиску такого заполнения сигнального пространства, при котором обеспечивается высокая удельная скорость (сигналы расположены достаточно плотно) и одновременно высокая помехоустойчивость (сигналы достаточно далеко друг от друга).

Комбинирование различных ансамблей  $m$ -ичных сигналов, помехоустойчивых и манипуляционных кодов порождает множество конструкций. Однако только согласованные варианты обеспечивают повышение частотно - энергетической эффективности СЭС.

Эти варианты называют **сигнально - кодовыми конструкциями (СКК)**. Рассмотрим обобщенную схему передачи дискретных сообщений, приведенную на рис.2.4.

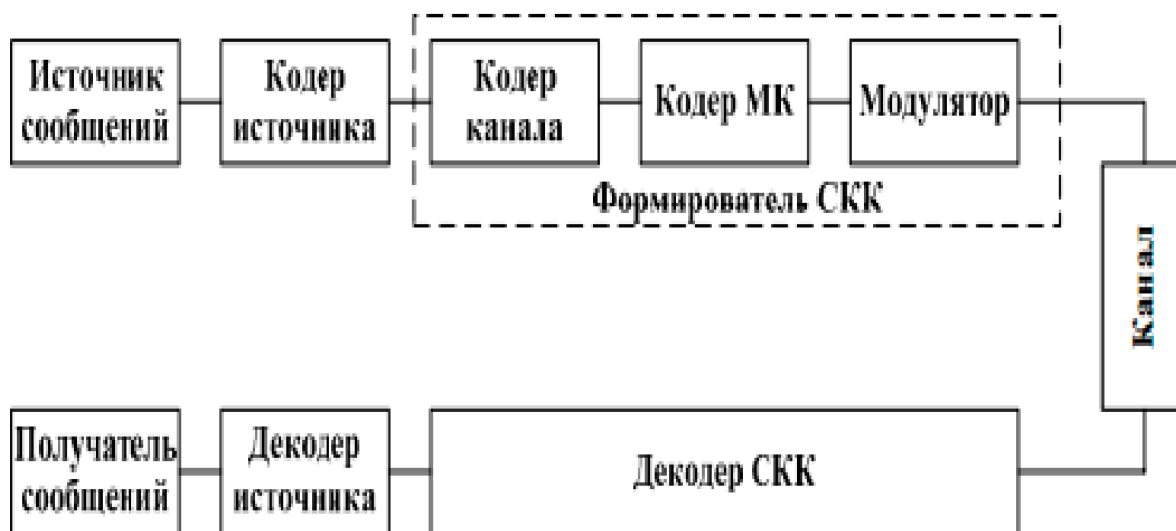


Рис. 2.4. Обобщенная схема передачи дискретных сообщений

Последовательность символов с выхода кодера канала разбивается на блоки по  $n$  символов. Отображение блоков в сигналы, формируемые модулятором, осуществляется по правилу манипуляционного кодирования, т.е. манипуляционный код определяет правило соответствия блоков кодовых символов  $m$  - ичным сигналам. Например, в случае двоичного канального кода каждому из  $m = 2^n$  кодовых блоков ставится в соответствие один из  $2^n$  сигналов.

Оптимальная процедура приема СКК заключается в обработке сигнально - кодового

блока в целом. Поэтому демодулятор, декодеры канала и манипуляционный декодер рассматриваются как единое устройство – декодер СКК (рис.2.4).

Декодер СКК строится так, чтобы минимизировалась вероятность ошибки приема. Оптимальный декодер реализует принцип максимального правдоподобия. При белом гауссовском шуме выбирается кодовое слово, находящееся на минимальном евклидовом расстоянии от принятого.

Декодирование МК можно рассматривать как последний этап обработки сигнально – кодового блока оптимальным декодером СКК. При этом декодер канала работает в метрике Евклида с сигналами, а не с их двоичными представлениями по правилу манипуляционного кода. Схема поэлементного приема, наоборот, ориентирована на применение декодера канала в метрике Хемминга, т.е. обработку двоичных величин после декодера манипуляционного кода.

Следовательно, достижение наибольшей эффективности возможно при декодировании по алгоритму максимального правдоподобия сигнально - кодового блока в целом». Необходимо отметить, что в принципе любой сигнальный ансамбль на выходе последовательно соединенных кодека и модема может быть отнесен к СКК. Введение понятия СКК отражает подход к модуляции и кодированию как процессу объединения сигналов и кодов в единую эффективную конструкцию.

### **Классификация сигнально – кодовых конструкций**

В основе формирования СКК лежат операции отображения информационной последовательности в кодовую, путем внесения избыточности и кодовой последовательности в канальную заданием манипуляционного кода. Помехоустойчивое кодирование, повышающее энергетическую эффективность СЭС, является одной из важнейших операций формирования СКК. Получаемый при этом энергетический выигрыш от кодирования зависит от степени увеличения минимального сигнального расстояния между разрешенными кодовыми блоками. В качестве сигнального для канала АБГШ используется расстояние Евклида. Асимптотический энергетический выигрыш определяется формулой [21]:

$$\text{ЭВК[ДБ]} = 20 \lg \left( \frac{d_{ef}}{d_e} \right), \quad (2.12)$$

где,  $d_{ef}$  – минимальное евклидово расстояние между разрешенными кодовыми блоками;  $d_e$  – минимальное евклидово расстояние между различными некодированными

последовательностями канальных символов одинаковой мощности с кодированными символами.

Согласно (2.1), для получения больших величин энергетического выигрыша при построении СКК необходимо подбирать коды, максимизирующие минимальное евклидово расстояние между разрешенными кодовыми комбинациями. В основу классификации СКК можно положить отличительные особенности по типам помехоустойчивого кода, по типам ансамблей сигналов и по способам согласования модуляции и кодирования.

По типу помехоустойчивых кодов все СКК могут быть поделены на два больших класса: СКК на основе блочных кодов и СКК на основе непрерывных кодов. Кроме того, отдельный класс составляют СКК на основе каскадных кодов, в которых применяются одновременно блочные и непрерывные коды. Каждый из классов делится на группы по конкретным видам кода.

Среди блочных наиболее употребимыми являются коды Хэмминга, Голея, БЧХ, Рида - Соломона, Рида-Маллера и др. Непрерывные коды на практике представлены сверточными кодами, которые обладают дополнительными свойствами линейности, и постоянства во времени.

При использовании сверточного кода практически удобным является случай, когда при объеме ансамбля сигналов  $m = 2k + 1$  скорость сверточного кода выбирается равной  $R_{\text{СКК}} = k/k + 1$ . Тогда частотная эффективность у системы с кодированием и без него одна и та же. Поскольку каждый кодовый блок длиной  $(k + 1)$  переносится одним двумерным сигналом, то и СКК считается также двумерной.

Декодирование СКК ведется обычно по алгоритму Витерби, реализующему принцип максимального правдоподобия. Одно из важнейших преимуществ СКК заключается в простоте применения алгоритма Витерби для мягкого решения на выходе демодулятора.

Любая СКК вне зависимости от способа согласования модуляции и кодирования представляет собой каскадный код с ансамблем сигналов на внутренней ступени и одним или несколькими помехоустойчивыми кодами на внешней. При использовании нескольких помехоустойчивых кодов говорят о построении СКК на основе обобщенного каскадного кода.

По типу ансамблей сигналов СКК делятся на конструкции с одномерными, двумерными и многомерными сигналами. Многомерные сигналы состоят из более простых (одномерных, двумерных) сигналов. При использовании в качестве составляющих двумерных сигналов число позиций  $M$ , соответствующих каждому  $n$  – мерному сигналу, определяется выражением  $M = m^n/2$ , где  $m$  – позиционность

двумерного сигнала.

Каждый  $n$  – мерный сигнал в этом случае образуется последовательностью  $n/2$  двумерных сигналов. Например, для получения многомерного сигнала с  $n = 6$  требуется последовательность из трех двумерных сигналов, например ФМн-4.

Способы согласования модуляции и кодирования условно можно разделить на две группы: согласование кодом Грея и согласование на основе разбиения ансамбля на вложенные подансамбли.

Сигнально-кодовые конструкции, принадлежащие первой группе, представляют собой результат согласования известных двоичных помехоустойчивых кодов с многопозиционным ансамблем сигналов путем использования кода Грея в качестве манипуляционного кода. Поскольку ошибки происходят за счет переходов в области соседних сигналов, то кодовые блоки, соответствующие соседним сигналам, должны различаться наименьшим числом двоичных символов.

Вторая группа включает в себя достаточно большое число типов СКК, различающихся модификациями методов согласования. Разбиение осуществляется таким образом, что подансамбли содержат равное количество сигналов, расстояния между соседними сигналами подансамблей одинаковы, а минимальные расстояния между сигналами подансамблей увеличиваются с каждым шагом разбиения. Широкое практическое применение получило согласование путем разбиения ансамбля на вложенные подансамбли, когда внешними кодами являются сверточные коды. В основе синтеза СКК со сверточными кодами лежит поиск кодов, максимизирующих евклидово расстояние, причем обычно эти коды не являются оптимальными в метрике Хэмминга. У решетчатой диаграммы, описывающей сверточные коды в метрике Евклида, переходы между состояниями промаркированы не двоичными блоками, а сигнальными точками.

Таким образом, достижение близких к предельным показателей частотно - энергетической эффективности цифровых систем связи предполагает согласование кодека и модема с учетом статистических свойств непрерывного канала. Одно из решений подобного согласования представляют сигнально-кодовые конструкции сверточного кодирования. Мягкое декодирование по алгоритму Витерби обеспечивает энергетический выигрыш порядка 3...7 дБ без расширения занимаемом полосы частот.

**Характеристики основных типов СКК. Согласование канала кодом Грея**  
Рассмотрим СКК, представляющие собой результат согласования известных двоичных помехоустойчивых кодов с многопозиционным ансамблем сигналов путем использования в качестве манипуляционного кода Грея (табл. 4.1).

Комбинации кода в табл. 4.1 получены по следующему правилу. Кодовая комбинация натурального кода складывается по модулю 2 с такой же комбинацией, сдвинутой на один разряд вправо, при этом младший разряд сдвинутой комбинации отбрасывается.

Таблица 4.1.

Результат согласования двоичных помехоустойчивых кодов с кодом Грея

Десятичное число	Натуральный двоичный код	Код Грея
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

Поскольку ошибки чаще происходят за счет переходов в области соседних сигналов, то кодовые блоки, соответствующие соседним сигналам, должны различаться наименьшим числом двоичных символов.

На рис. 2.4 приведены примеры кода Грея для ансамблей одномерных (АМ-4) и двумерных (ФМ-4, КАМ-16) сигналов.

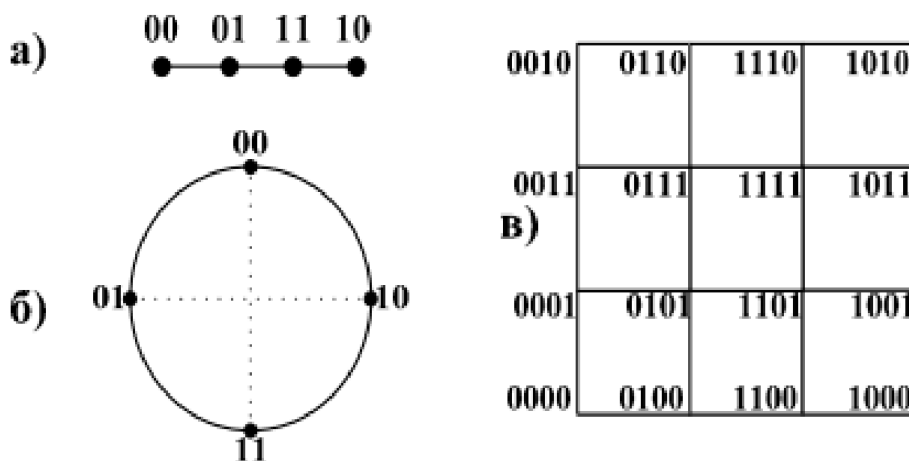


Рис. 2.4. Коды Грея ансамблей: одномерных: а) АМ-4; б) ФМ-4; двумерных: КАМ-16

Несмотря на достаточно высокие показатели энергетической эффективности при мягком решении в демодуляторе и декодировании алгоритмом Витерби, согласование



кодом Грея не является оптимальным.

Двоичные коды, оптимальные по критерию максимума хэммингова расстояния, будут оптимальны и по критерию максимума свободного евклидова расстояния, если при отображении двоичных подблоков в сигнальные точки ансамбля выполняется принцип: большему расстоянию Хэмминга  $dh \max$ , соответствует большее расстояние по Евклиду  $de \max$ .

Простейшие ансамбли сигналов АМн-2, ФМн-2, ФМн-4 этому условию для кода Грея удовлетворяют. В табл. 4.4 показаны комбинации (подблоки) двоичного кода длиной  $n = 3$ , а также расстояния  $dh$  и  $de$  при использовании кода Грея для ФМн-8 (см. рис. 2.5).

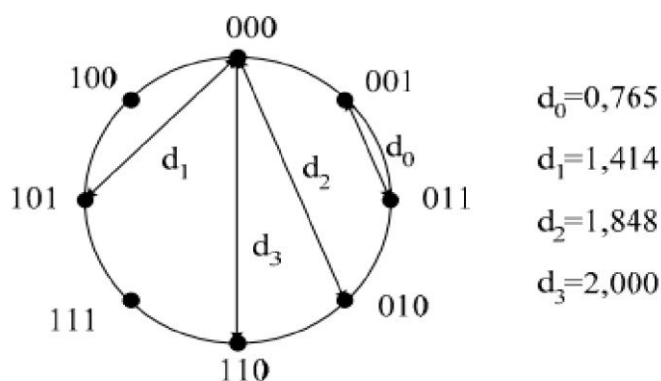


Рис. 2.5. Расстояние между сигнальными точками ФМн-8

Как следует из таблицы, сформулированный принцип соответствия большему расстоянию Хэмминга большего расстояния Евклида для всех вариантов отображения не выполняется. Например, для комбинации 111 большему расстоянию Хэмминга  $dh = 3$  соответствует не самое большое расстояние Евклида  $dh = 1,848$ , и т.д.

### Соответствие расстояний Хэмминга и Евклида для сигналов ФМн-8

Кодовые комбинации	000	001	011	010	110	111	101	100
$d_h$	0	1	2	1	2	3	2	1
$d_e$	0	0,765	1,414	1,848	2,000	1,848	1,414	0,765

Таким образом поскольку манипуляционный код Грея для сложных сигналов не обеспечивает оптимального согласования кодека и модема, необходимо найти методы дальнейшего повышения свободного евклидова расстояния  $def$  и, соответственно, энергетической эффективности  $\beta$ .

## Согласование на основе разбиения ансамбля на вложенные подансамбли

В начале 80 х гг. Унгербок (Ungerboeck G.) опубликовал статью, в которой, анализируя СКК на базе ансамбля ФМн-8 и сверточного кода со скоростью  $R_{КК} = k / k + 1$ , сформулировал ряд правил построения СКК. Поэтому СКК построенные по этим правилам (Trellis-Coded Modulation – TCM), часто называют СКК Унгербока.

По способу согласования модуляции и кодирования СКК Унгербока относятся к конструкциям, полученным на основе разбиения ансамбля сигналов на вложенные подансамбли. Разбиение осуществляется таким образом, что подансамбли содержат равное количество сигналов, расстояния  $de$  между соседними сигналами подансамблей одинаковы, минимальные расстояния  $de_{\min}$  между сигналами подансамблей увеличиваются с каждым шагом разбиения; при этом левая ветвь разбиения кодируется символом «0», а правая «1». Считывание кодовой комбинации, соответствующей сигнальной точке на амплитудно-фазовой плоскости, осуществляется снизу вверх. Разбиение для ансамбля сигналов ФМн-8 представлено на рис. 2.6.

Как следует из рис. 2.6, исходный ансамбль разбивается на подансамбли при максимальном увеличении наименьших расстояний  $de_{\min}$  между сигналами внутри подансамблей  $d_0 < d_1 < d_2 < d_3$ . Разбиение осуществляется поэтапно.

В данном примере три этапа, заключающихся в разбиении каждого из подансамблей пределы предыдущего этапа на 2 равноэлементных подансамбля.

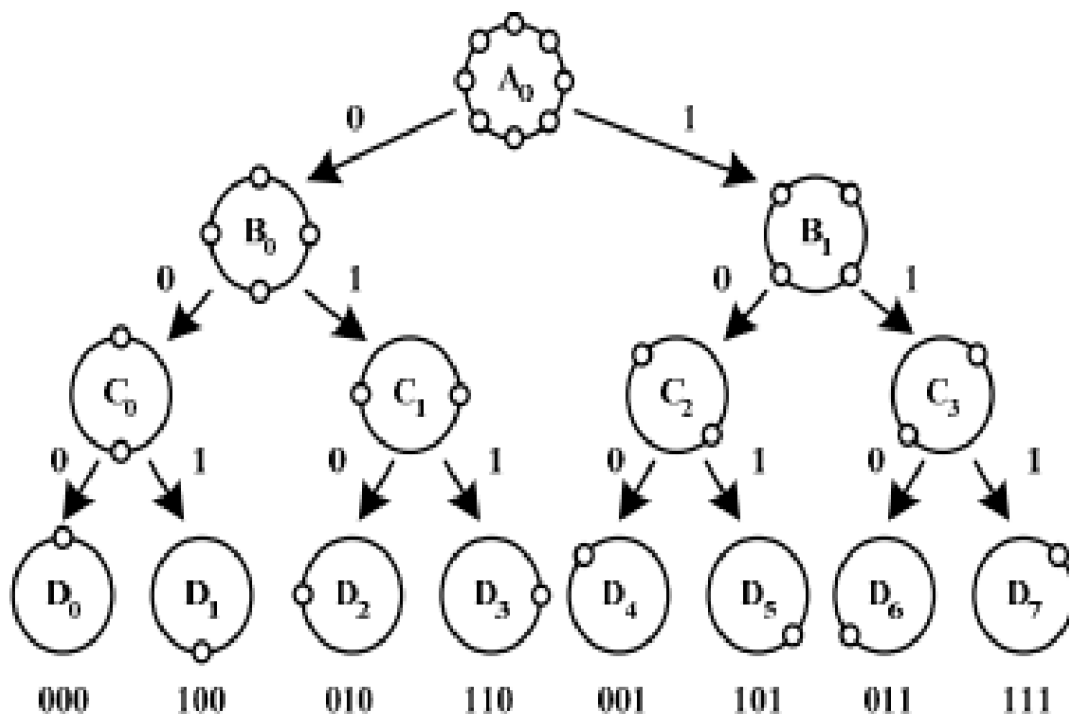


Рис.2.6. Разбиение ансамбля сигналов ФМн-8

В общем случае количество этапов  $i$  полного разбиения ансамбля из  $m$  сигналов на вложенные подансамбли определяется выражением:  $i_{\max} = \log_2 m$ , (4.6), т. е. совпадает кратностью ансамбля  $n$ . В ансамбле из  $m$  сигналов кратности  $n$  каждой сигнальной точке соответствует блок двоичных символов  $b = [b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_0]$ . Соответствие между кодовым блоком  $b$  и сигнальной точкой на плоскости определяет манипуляционный код.

Достижение наибольшей помехоустойчивости непосредственно связано с увеличением евклидова расстояния между передаваемыми сигнальными последовательностями. Решетчатая диаграмма сверточного кода (5.6.3), ребра которой промаркированы сигнальными точками, полностью отображает весь набор разрешенных сигнальных последовательностей.

Таким образом, величина свободного евклидова расстояния  $d_{\text{эф}}$  зависит от маркировки ребер решетчатой диаграммы сигнальными точками (канальными символами).

Унгербок на примере ансамбля сигналов ФМн-8 (см. рис. 4.6) сформулировал четыре необходимых правила маркировки ребер сигнальными точками: все сигнальные точки используемого ансамбля сигналов должны встречаться с одинаковой частотой и с определенной степенью регулярности и симметричности;

переходы из одного и того же состояния соответствуют сигналам из подансамблей  $B_0$  или  $B_1$ ;

переходы в одно и то же состояние соответствуют сигналам из подансамблей  $B_0$  или  $B_1$ ;

параллельные переходы между состояниями соответствуют сигналам из подансамблей  $C_0$  или  $C_1$ , или  $C_2$ , или  $C_3$ . Как показывает анализ, СКК Унгербока имеют несколько более высокие частотно-энергетические характеристики по сравнению с традиционными СКК, при той же сложности реализации. Это определило их бурное внедрение в технике связи. Но известные правила построения СКК Унгербока, хотя и снижают размерность переборной задачи синтеза, но не обеспечивают гарантированное построение СКК с максимальными частотно-энергетическими характеристиками. В то же время, основной целью работ в области синтеза систем сигналов и СКК является поиск таких способов их формирования и обработки, которые при заданных ограничениях на сложность устройств формирования и приема, временные задержки, позволяли бы приблизиться к известной шенноновской границе.

При построении многомерных СКК возникает проблема выбора манипуляционного кода, поскольку известные методы его построения (правила построения кодов Грея и разбиения ансамбля на вложенные подансамбли Унгербока) не всегда позволяют

согласовать евклидовы и хемминговы расстояния. Именно с этим связаны многие проблемы построения многомерных СКК.

Синтез многопозиционных ансамблей сигналов и СКК, построенных на их основе, является одним из направлений решения более общей задачи статистического согласования вероятностных характеристик передаваемого информационного сигнала и вероятностных характеристик канала. В рамках этих традиционных задач, такое согласование осуществляется на уровне канальных символов или их блоков (супербукв канала). При этом подходы к построению алфавита таких супербукв (ансамблей сигналов и СКК) могут существенно отличаться между собой, но направлены на решение этой общей проблемы.

Известно, что ансамбль сигналов, соответствующий полному двоичному коду длины  $n$  в пространстве соответствующей размерности  $n$ , построенный заменой «1» на «-1», а «0» на «+1», соответственно, обладает практически идеальным манипуляционным кодом. Минимальным хемминговым расстояниям таких ансамблей соответствуют ребра  $n$ -мерного куба, которые характеризуются и минимальными евклидовыми расстояниями.

Кодовые комбинации и соответствующие им координаты сигнальных векторов приведены в табл. 2.2; графическое изображение ансамбля представлено на рис. 2.13. При приеме сигналов такого ансамбля минимальная ошибка (ошибочный прием одной координаты сигнальной точки) приводит к неправильному приему одного бита информации. Ошибочный прием двух координат сигнальной точки приводит к искажению двух бит информации и так далее. Однако, если рассмотреть зависимость между хемминговыми  $dh(i, j)$  и евклидовыми  $de(i, j)$  расстояниями для такого ансамбля, то можно выявить следующую закономерность, связывающую эти две величины :

$$de(i, j) = 2r \sqrt{dh(i, j)},$$

(2.13)

где  $r$  – радиус сферы.

Взаимосвязь кодовых комбинаций манипуляционного кода и координат  
сигнальных векторов

Манипуляционный код	Координаты сигнальных векторов
000	+1,+1,+1
001	+1,+1,-1
010	+1,-1+1
011	+1,-1,-1
100	-1,+1,+1
101	-1,+1,-1
110	-1,-1,+1
111	-1,-1,-1

Таким образом, взаимосвязь между евклидовыми и хемминговыми расстояниями в многомерном ансамбле сигналов нелинейная, хотя большему хемминговому расстоянию будет соответствовать большее евклидово расстояние. Если мощность и энергия сигналов являются постоянными величинами, не зависящими от номера, то ансамбли таких сигналов считают сигналами поверхностно-сферической упаковки.

В противном случае ансамбли сигналов рассматривают как объемные упаковки. Сохранение манипуляционного кода, принятого для простого трехмерного куба, в значительной мере сохраняет пропорциональность между евклидовыми и хемминговыми расстояниями и поэтому будет наилучшим и для наиболее плотного ансамбля. Для других комбинаций манипуляционных кодов для сигнальных векторов изначально не будет соблюдаться взаимная пропорциональность между евклидовыми и хемминговыми расстояниями.

Таким образом, практически невозможно создать идеальный манипуляционный код и, следовательно, целесообразно строить манипуляционные коды, у которых хотя бы частично выполняется взаимосвязь между евклидовыми и хемминговыми расстояниями.

### **2.3. Исследование метода сверточного декодирования на основе последовательного алгоритма Витерби. Метод максимума правдоподобия**

В настоящее время по каналам связи передаются цифровые данные со столь высокими требованиями к достоверности передаваемой информации, что удовлетворить эти требования традиционным совершенствованием антенно-фидерных трактов радиолиний, увеличением излучаемой мощности, снижением собственного шума приемника оказывается экономически невыгодным или просто невозможным.

Высокоэффективным средством борьбы с помехами в цифровых системах связи является применение помехоустойчивого кодирования, основанного на введении искусственной избыточности в передаваемое сообщение, что приводит к расширению используемой полосы частот и уменьшению информационной скорости передачи.

В современных системах связи используются в той или иной степени помехоустойчивые коды – блочные циклические коды, в сотовых системах связи применяются как блочные, так и сверточные коды, в подавляющем большинстве спутниковых систем связи, в основном, используются непрерывные сверточные коды.

Среди различных алгоритмов последовательного кодирования и декодирования сверточных кодов выделяется алгоритм Витерби. Преимущество декодирования Витерби по сравнению с декодированием по методу полного перебора заключается в том, что сложность декодера Витерби не является функцией количества символов в последовательности кодовых слов.

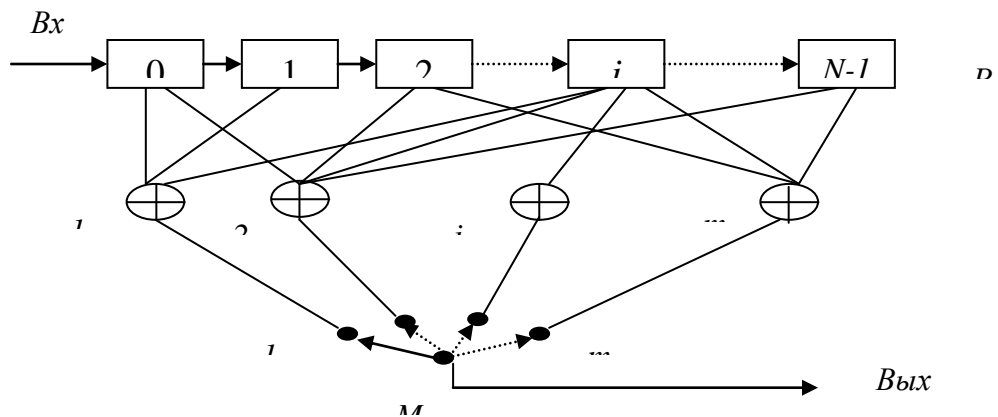
Целью данной работы является проектирование и испытание учебного программного комплекса визуализации и исследования метода сверточного декодирования на основе последовательного алгоритма Витерби.

В настоящее время в системах передачи данных очень широко используется сверточное кодирование вместе с декодированием по алгоритму Витерби. Алгоритм Витерби представляет собой декодирование по максимуму правдоподобия и используется для исправления одиночных ошибок.

Сверточные коды являются непрерывными, то есть относятся к классу древовидных кодов. Символы последовательности на выходе кодера такого кода образуются путем суммирования по модулю 2 каждого информационного символа с некоторым набором предыдущих символов [1].

Кодирующее устройство сверточного кода в общем виде представлено на рисунке 1[1].

При поступлении на вход кодера каждого информационного символа  $U_i$



мультиплексор

Рис. 2.7. Кодирующее устройство сверточного кода в общем виде

$M$  последовательно считывает за один такт сигналы с выходов всех сумматоров по модулю 2, формируя на выходе  $m$  символов  $V_i$ . Таким образом, при скорости входной последовательности  $V_{вх}$  бит/с скорость выходной последовательности составляет  $V_{вых} = mV_{вх}$  бит/с.

Для представления связей между ячейками регистра сдвига и сумматорами, используется следующий прием: каждый сумматор описывается порождающим (образующим, формирующим) полиномом [2]:

$$g_j(D) = 1 + D + D^2 + D^3 + \dots + D^n \quad (2.14)$$

Степени полинома соответствуют номерам ячеек регистра сдвига (слева направо), с которыми  $j$ -й сумматор имеет связь. Например, в радиоканалах подвижной связи стандарта GSM (Глобальная система подвижной связи) используются сверточные кодеры с  $N=5$  и порождающими полиномами [2]:

$$g_1 = 1 + D^2 + D^3 + D^4 \text{ и } g_2 = 1 + D + D^4 \quad (2.15)$$

Сверточный код может быть систематическим (разделимым) или несистематическим (неразделимым). Для систематического кода один из полиномов  $g_j$  должен быть равен 1 ( $g_j=1$ ).

Тогда на выходе соответствующего сумматора мы имеем входную информационную последовательность, а кодовая последовательность на выходе кодера является разделимой на информационные и (добавленные) проверочные символы. При использовании в декодере алгоритма Витерби предпочтение отдается несистематическим кодам.

Каждый информационный символ находится в регистре сдвига в течение  $N$  тактов и влияет на  $N \cdot m$  передаваемых символов  $V_i$ . Величина  $N$

называется памятью сверточного кода. В общем случае число символов на выходе сверточного кодера, соответствующее передаче информационной последовательности длиной  $L$  символов составляет [2]:

$$(L+N)*m \quad (2.16)$$

Обычно  $L \gg N$ . Сверточный код характеризуется скоростью [2]:

$$R=k/m \quad (2.17)$$

где  $k$  – число входов сверточного кодера;

$m$  – число выходов, то есть число сумматоров.

На практике чаще всего используются коды со скоростью  $R=1/2$ .

Несмотря на большую избыточность сверточные коды очень широко применяются в современных системах передачи данных, благодаря хорошим корректирующим свойствам.

## **Алгоритмы декодирования сверточных кодов**

### **Классификация алгоритмов декодирования**

При оптимальной обработке с целью вынесения решения принятую из канала последовательность символов необходимо сопоставить со всеми возможными передаваемыми последовательностями. Так как число возможных последовательностей длины  $N$  двоичного кода равно  $2^N$ , то при больших длинах последовательностей декодер становится недопустимо сложным (экспоненциальная сложность декодирования), а оптимальное декодирование – практически трудно реализуемым. Однако, именно при больших  $N$  возможно значительное повышение надежности передачи, так как действие шума усредняется на длинной последовательности. Поэтому важной является проблема снижения сложности алгоритмов декодирования сверточных кодов.

Известны две группы методов декодирования сверточных кодов:

#### **1. Алгебраические методы декодирования**

Основаны на использовании алгебраических свойств кодовых последовательностей. В ряде случаев эти методы приводят к простым реализациям кодека. Такие алгоритмы являются неоптимальными, так как используемые алгебраические процедуры декодирования предназначены для исправления конкретных (и не всех) конфигураций ошибок в канале. Алгебраические методы отождествляют с поэлементным приемом



последовательностей, который для кодов с избыточностью, как известно, дает худшие результаты, чем «прием в целом». Наиболее простым из алгебраических алгоритмов является **алгоритм порогового декодирования** сверточных кодов. Этот алгоритм далек от оптимального и поэтому редко используется, а используется, в первую очередь, в системах с высокой скоростью передачи информации [3].

## **2. Вероятностные методы декодирования**

Вероятностные методы декодирования значительно ближе к оптимальному «приему в целом», так как в этом случае декодер оперирует с величинами, пропорциональными апостериорным вероятностям, оценивает и сравнивает вероятности различных гипотез и на этой основе выносит решения о передаваемых символах.

Алгебраические алгоритмы оперируют с конечным алфавитом входных данных, для получения которых на выходе непрерывного канала необходимо выполнить квантование принимаемого сигнала с шумом. Процессы обработки сигналов в решающем устройстве на выходе демодулятора противоположных сигналов показаны на рисунке 2 [3].

В простейшем случае производят квантование каждого канального символа в отсчетный момент времени на два уровня (именуемое, как «жесткое решение» на выходе демодулятора). При жестком решении число уровней квантования  $L = 2$ . При этом жесткое решение представлено одним двоичным символом. Это показано на рисунке 2, б).

При «мягком решении» рисунок 2, г) число уровней квантования  $L > 2$ .

При мягком решении выход квантователя более точно описывает величину отсчета сигнала с помехой, что повышает помехоустойчивость декодирования.

Известны два основных вероятностных алгоритма декодирования сверточных кодов, а также их различные модификации

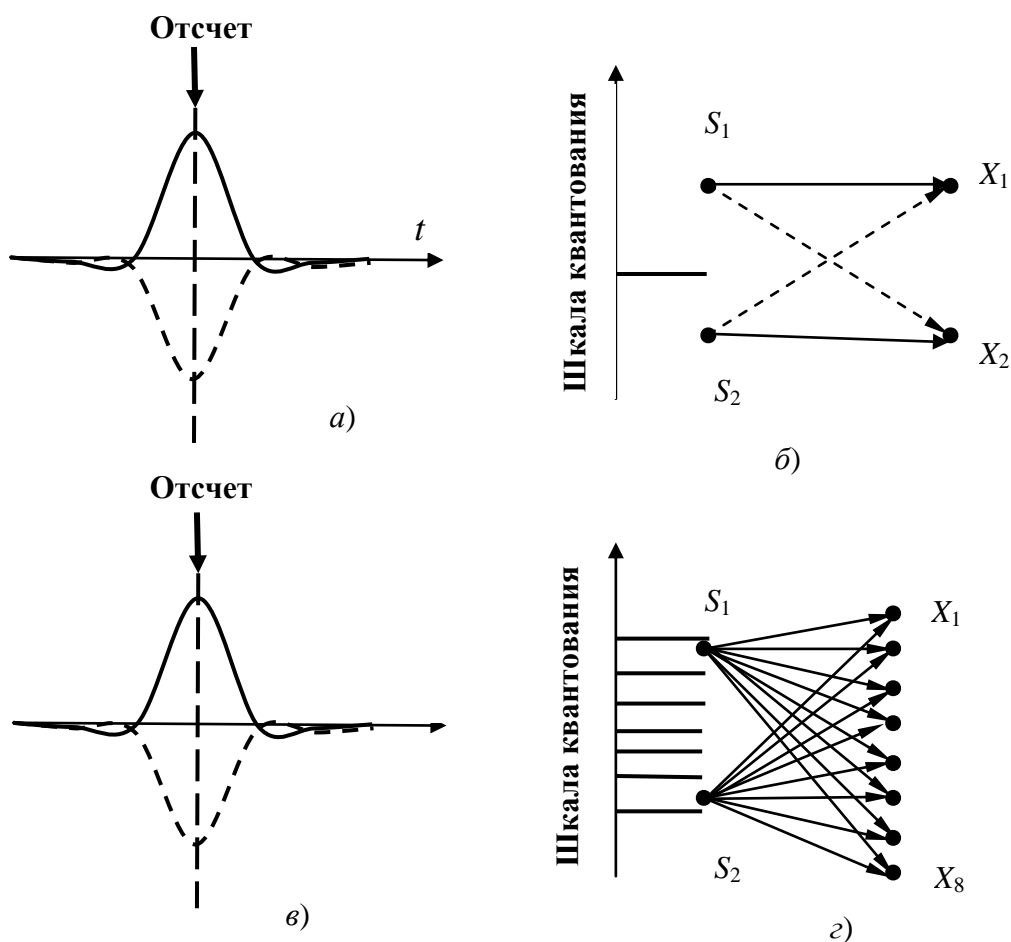


Рисунок 2.8 – Пояснение работы решающего устройства в демодуляторе  
 а, в) – формы противоположных сигналов в момент отсчета на входе  
 решающего устройства демодулятора.  
 б) – шкала квантования и граф переходов при жестком решении.  
 г) – шкала квантования и граф переходов при мягком решении.

### 2.1 Алгоритм последовательного декодирования

Данный алгоритм обеспечивает произвольно малую вероятность ошибки при ненулевой скорости передачи сообщений по каналу. При последовательном декодировании производится поиск пути на кодовой решетке, соответствующего переданной информационной последовательности.

Последовательное декодирование используется для декодирования длинных сверточных кодов [3].

Другой разновидностью вероятностных алгоритмов является алгоритм,

основанный на принципе динамического программирования, и известный как «Алгоритм Витерби».

Принцип динамического программирования был сформулирован в 1940 г. Р. Беллманом. С тех пор он нашел широкое приложение в теории управления и теории цепей. В 1970 г. динамическое программирование, в форме алгоритма декодирования сверточных кодов (алгоритма Витерби), было применено А. Витерби к проблемам телекоммуникации [4].

**2.2 Алгоритм Витерби** находит широкое применение и реализует поиск максимально правдоподобного пути на кодовой решетке с отбрасыванием части части наименее правдоподобных вариантов путей на каждом шаге декодирования. Алгоритм Витерби характеризуется постоянством вычислительной работы, однако сложность декодера Витерби растет, как при всех переборных алгоритмах, по экспоненциальному закону от длины кодового ограничения сверточного кода. Поэтому алгоритм Витерби используется для декодирования коротких сверточных кодов [5].

### **Алгоритм Витерби для декодирования сверточных кодов**

Рассмотрим алгоритм Витерби на примере кода со скоростью  $R_{\text{код}} = 1/n$ .

Пусть, начиная с момента времени  $t = 0$ , на вход кодера подается информационная последовательность длиной  $L$  символов:

$$a_L = (a_0, a_1, \dots, a_{L-1}) \quad (2.18)$$

Тогда на выходе кодера будет последовательность символов:

$$b_L = (b_0, b_1, \dots, b_{L-1}) \quad (2.19)$$

Состояние кодера в момент  $t$  определяют как набор из  $w$  информационных символов:

$$w_t = (a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-L+1}) \quad (2.20)$$

Решетчатая диаграмма кода однозначно связывает информационную последовательность  $a_L$ , последовательность состояний кодера  $w_L$  и последовательность символов на его выходе  $b_L$ .

Каждой ветви  $b_t$  в канале соответствует сигнал, который может быть представлен набором координат [2]:

$$S_t = (S_t^{(1)}, S_t^{(2)}, \dots, S_t^{(N)}) \quad (2.21)$$

где  $N$  – размерность пространства сигналов.

Допустим, что в канале действует аддитивная помеха. Тогда поступающая на вход декодера последовательность принимаемого сигнала будет равна [2]:

$$X_L = S_L + n_L \quad (2.22)$$

где  $S_L = (S_0, S_1, \dots, S_{L-1})$ ;

$n_L = (n_0, n_1, \dots, n_{L-1})$ ;

$n_t = (n_t^{(1)}, n_t^{(2)}, \dots, n_t^{(N)})$  – N-мерный вектор помехи.

Декодирование состоит в прослеживании по кодовой решетке пути с максимальной апостериорной вероятностью.

Декодированный путь можно указать одним из способов:

– набором оценок кодовых ветвей  $S_L = (S_0, S_1, \dots, S_{L-1})$ , составляющих путь;

– последовательностью оценок состояний кодера  $W_L = (w_0, w_1, \dots, w_{L-1})$ ;

– последовательностью оценок информационных символов на входе кодера  $A_L = (a_0, a_1, \dots, a_{L-1})$ , которые совпадают с первыми символами оценок состояний  $S = (s_0, s_1, \dots, s_{t-v+1})$ .

Последовательность  $X_L$  будет декодирована с минимальной вероятностью ошибки, если из всех возможных путей выбрать оценку  $S_L$ , для которой максимальна апостериорная вероятность  $P(S_L/X_L)$ . Передачу всех вариантов наборов  $a_L$  считают равновероятной. В этом случае декодирование по критерию максимума апостериорной вероятности равносильно декодированию по критерию максимума правдоподобия, когда выбирается оценка  $S_L$ , обеспечивающая выполнение условия  $P(S_L/X_L) = \max$ . В канале без памяти условная вероятность  $P(S_L/X_L)$  пропорциональна произведению условных плотностей суммы сигнала и помехи [2]:

$$P(X_L/S_L) = \prod_{t=0}^{L-1} P(X_t/S_t) = \prod_{t=0}^{L-1} P(X_t^{(0)} X_t^{(1)} \dots X_t^{(N)} / S_t^{(0)} S_t^{(1)} \dots S_t^{(N)}) \quad (2.23)$$

В гауссовском канале при действии белого шума с односторонней спектральной плотностью мощности  $N_0$  каждый сомножитель этого произведения имеет вид:

$$p(X_L/S_L) = (1/\sqrt{\pi N_0})^N \exp\{-[\sum_{i=1}^N (X_t^{(i)} - S_t^{(i)})^2]/2N_0\} \quad (2.24)$$

Для отыскания максимума прологарифмируем:

$$\ln P(X_L / S_L) = \ln \prod_{t=0}^{L-1} (1/\sqrt{\pi N_0})^N \times$$

$$\times \exp\{-[\sum_{t=1}^N (X_t^{(i)} - S_t^{(i)})^2] / 2N_0\} = NL \ln(1/\sqrt{\pi N_0}) - \sum_{t=0}^{L-1} \sum_{i=1}^N (X_t^{(i)} - S_t^{(i)})^2 / 2N_0.$$

(2.25)

При декодировании выбирают последовательность сигналов  $S_L = (S_0, S_1, \dots, S_{L-1})$  и однозначно связанную с ней последовательность ветвей  $S_L = (S_0, S_1, \dots, S_{L-1})$ , которая обеспечивает минимум суммы:

$$МП = \sum_{t=0}^{L-1} \sum_{i=0}^N (X_t^{(i)} - S_t^{(i)})^2 = \min \quad (2.26)$$

Выражение которая называется метрикой декодированного пути. Метрика пути содержит в качестве слагаемых метрики ветвей [4]:

$$MB = \sum_{i=1}^N (X_t^{(i)} - S_t^{(i)})^2 \quad (2.27)$$

В гауссовском канале метрика ветви пропорциональна квадрату Евклидова расстояния между вектором принимаемой суммы сигнала и помехи  $X_t$  и вектором сигнала  $S_t$ , соответствующего ветви кода  $A_t$ . В дискретном канале для оценки расстояний используют метрику Хемминга.

Периодическая структура решетчатой диаграммы существенно упрощает сравнение и выбор путей в соответствии с правилами декодирования. Число состояний на решетке ограничено, и два наугад выбранных достаточно длинных пути имеют, как правило, общие состояния. Отрезки путей, входящих в такие состояния, необходимо сравнить и выбрать путь с наименьшей метрикой. Такой путь называется выжившим. В соответствии с алгоритмом Витерби такое сравнение и отбрасывание отрезков путей производится периодически, на каждом шаге декодирования.

Рассмотрим декодирование кода (7;5), символы которого передаются по дискретному каналу (см. рисунок 2.7) [5].

В этом случае метрика ветви (МВ) равна расстоянию Хемминга между набором символов  $(X^{(1)}X^{(2)})$  на входе декодера и набором символов  $(S^{(1)}S^{(2)})$ , соответствующих данной ветви на решетчатой диаграмме. Если  $(X^{(1)}X^{(2)})=(01)$ , то значения МВ для кода (7;5) с решеткой, изображенной на рисунок 3, а) будут равны  $MB(00) = 1$ ,  $MB(01) = 0$ ,  $MB(11) = 1$  и  $MB(10) = 2$ .



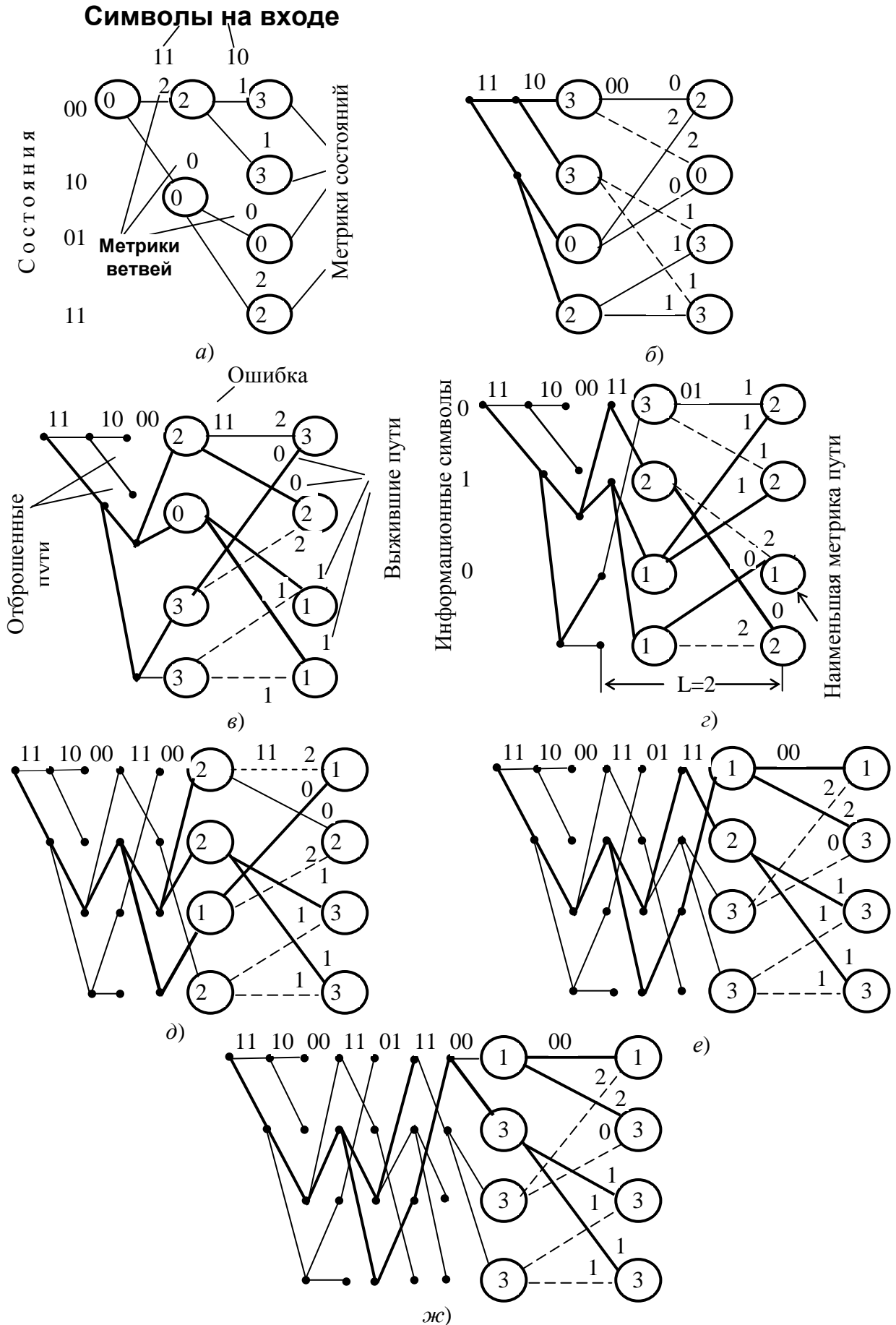


Рис. 2.7. Декодирование кода (7;5)

Метрика пути (МП) есть сумма метрик ветвей, образующих некоторый путь на решетчатой диаграмме. Путь конечной длины оканчивается в определенном состоянии. Метрика состояния (МС) равна метрике пути, который заканчивается в данном состоянии.

Шаг декодирования состоит в обработке декодером принимаемых из канала данных в интервале между двумя соседними отсчетами.

На рисунке 3 б) ...ж) показано развитие процесса декодирования символов сверточного кода со скоростью  $R_{\text{код}} = 1/2$  и длиной кодирующего регистра  $K = 3$ .

На вход декодера поступают пары символов из канала: (...11,10,00,11,01...) (декодирование с жестким решением). Цифрами около ветвей обозначены метрики ветвей, цифры в кружках обозначают метрики состояний.

В начальный момент времени полагаем, что декодер находится в состоянии 00 и исходная метрика этого состояния  $MC(00) = 0$  (рисунок 3 а)). Если из канала поступили символы 11, то метрики ветвей 00 и 11, выходящих из этого состояния, будут  $MB(00) = 2$  и  $MB(11) = 0$ . Это отмечено на первом шаге декодирования. Так как других ветвей, выходящих из состояний 00 и 11, нет, то метрики этих состояний принимаются равными метриками входящих ветвей  $MC(00) = 2$  и  $MC(10) = 2$ . Аналогичная картина имеет место и на следующем шаге декодирования, когда из канала поступает пара символов (10). Здесь  $MB(00) = 1$ ,  $MB(11) = 1$ ,  $MB(10) = 0$  и  $MB(01) = 2$ . Метрики состояний на этом шаге определяются теперь как суммы метрик входящих ветвей с метриками предыдущих состояний:  $MC(00) = 2+1 = 3$ ;  $MC(10) = 2+1 = 3$ ;  $MC(01) = 0+0 = 0$  и  $MC(11) = 0+2 = 2$ .

На этом процесс развития решетчатой диаграммы для данного кода заканчивается.

Алгоритм заключается в повторении одного основного шага. На каждой из последующих диаграмм рисунок 3 этот шаг изображен подробно. К началу  $i$ -го шага в памяти декодера хранятся метрики состояний, вычисленных на предыдущем этапе:

$$MC^{i-1}(00), MC^{i-1}(10), MC^{i-1}(01), MC^{i-1}(11) \quad (2.28)$$

По принятым канальным символам производится вычисление метрик



ветвей  $MV^i(00)$ ,  $MV^i(11)$ ,  $MV^i(10)$  и  $MV^i(01)$  и формирование четырех новых метрик состояний:  $MC^i(00)$ ,  $MC^i(10)$ ,  $MC^i(01)$  и  $MC^i(11)$

по следующему правилу [2]:

$$\begin{array}{l} MC^i(00) \quad \begin{array}{l} MP^i(00) = MC^{i-1}(00) + MV^i(00) \\ MP^i(00) = MC^{i-1}(01) + MV^i(11), \end{array} \\ MC^i(01) \quad \begin{array}{l} MP^i(01) = MC^{i-1}(10) + MV^i(10) \\ MP^i(01) = MC^{i-1}(11) + MV^i(01), \end{array} \end{array}$$

(2.29)

$$MC^i(10) \quad \begin{array}{l} MP^i(10) = MC^{i-1}(00) + MV^i(11) \\ MP^i(10) = MC^{i-1}(01) + MV^i(00), \end{array}$$

$$MC^i(11) \quad \begin{array}{l} MP^i(11) = MC^{i-1}(10) + MV^i(01) \\ MP^i(11) = MC^{i-1}(11) + MV^i(10). \end{array}$$

К каждому новому состоянию ведут два пути. К примеру, к состоянию 00 ведут пути из предыдущих состояний 00 и 01. На  $i$ -м шаге декодирования декодер вычисляет метрики путей как суммы метрик предыдущих состояний и метрик входящих ветвей.

Далее производится попарное сравнение метрик путей, входящих в каждое из состояний (пары показаны фигурными скобками). В результате сравнения выбирается меньшая метрика, и она считается метрикой данного состояния для последующего шага декодирования. Путь, входящий в данное состояние с меньшей метрикой, считается выжившим. На рисунке 3 отрезки выживших путей показаны сплошной линией. Пути, входящие в состояния с большими метриками, считаются отмершими (оборванными). Они показаны на решетчатой диаграмме пунктиром.

Таким образом, на каждом шаге декодирования в соответствии с алгоритмом Витерби, в каждом из состояний решетчатой диаграммы производятся однотипные операции:

- 1) Сложение метрик предыдущих состояний с метриками соответствующих ветвей.
- 2) Сравнение метрик входящих путей.
- 3) Выбор путей с наименьшими метриками, величины которых

используются как метрики состояний на последующем шаге декодирования. Если метрики сравниваемых путей одинаковы, то выбор одного из двух путей производится случайным образом.

На каждом шаге декодирования половина возможных продолжений путей отбрасывается. Другая половина образует продолжения путей для следующего шага декодирования, на котором вновь появляются два варианта продолжения каждого пути. Это обеспечивает постоянство количества вычислений, производимых на каждом шаге. Декодер прослеживает по кодовой решетке путь, имеющий минимальное расстояние от пути, который порождает кодер.

Таким образом, декодер, выбирающий на решетчатой диаграмме путь с наименьшей метрикой, минимизирует вероятность ошибки. Поскольку при декодировании анализу подвергаются последовательности конечной длины  $L$ , алгоритм не является строго оптимальным.

Результаты расчетов и моделирования показывают, что при соответствующем выборе величины  $L > (6...7)v$  можно получить результаты декодирования, достаточно близкие к оптимальным.

Сложность реализации алгоритма Витерби для декодирования сверточного кода можно оценить по формуле (С-complexity) [2]:

$$C = m^{(v+k)} \cdot L \quad (2.30)$$

На рисунке 2.8 показана структурная схема декодера Витерби, предназначенного для работы с демодулятором сигналов ФМ-4.

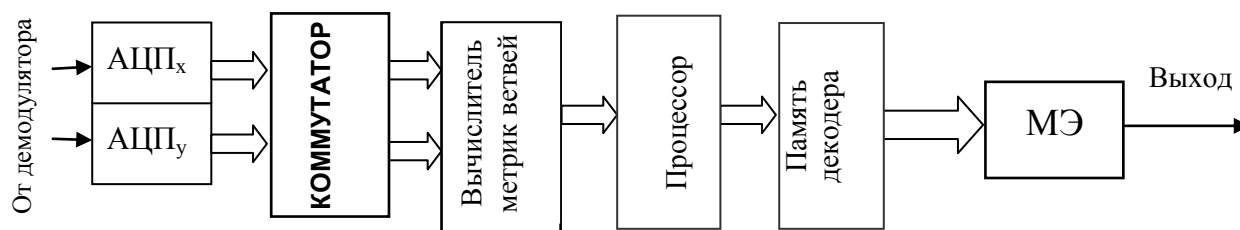


Рис. 2.8. Структурная схема декодера Витерби

Декодер состоит из АЦП в каналах X и Y, вычислителя метрик ветвей, процессора, в котором производятся операции сложения, сравнения и выбора, устройства памяти путей, которые выжили, и мажоритарного элемента МЭ, в котором выбирается путь с наибольшей метрикой. Оптимальное значение шага квантования зависит от отношения сигнал/шум

на входе АЦП. При восьми уровнях квантования минимум потерь обеспечивается при отношении размаха сигнала к шагу квантования, равном (4,5...5,5) [2].

### Реализация метода сверточного декодирования на основе последовательного алгоритма Витерби в MatLab/SIMULINK

Программная модель, разработанная с использованием подсистемы визуального моделирования Simulink. Позволяет провести исследование качественных характеристик системы связи с использованием сверточного кодирования при «мягком» и «жестком» решении.

Модель лабораторной макета в MatLab/Simulink для сверточного декодирования Витерби при «Мягком решении» представлена на рисунке 2.9.

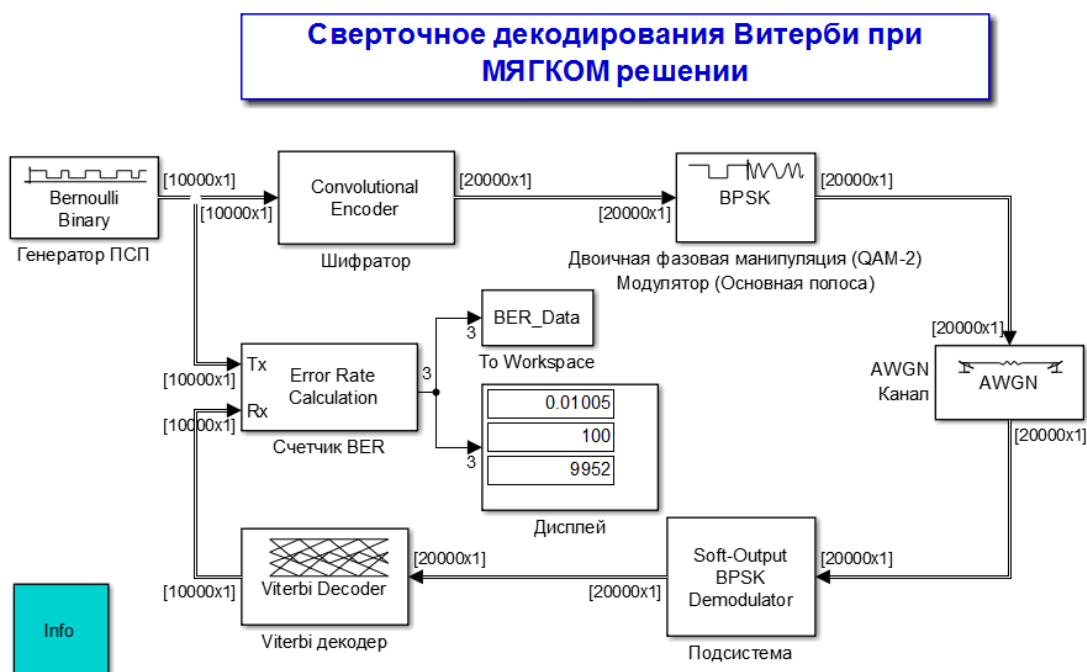


Рис. 2.9. Модель сверточного декодера Витерби при «Мягком решении».

#### Метод максимума правдоподобия

Модель лабораторной макет в MatLab/Simulink для сверточного декодирования Витерби при «Жестком решении» представлена на рисунке 6.

### Сверточное декодирование Витерби при ЖЕСТКОМ решении

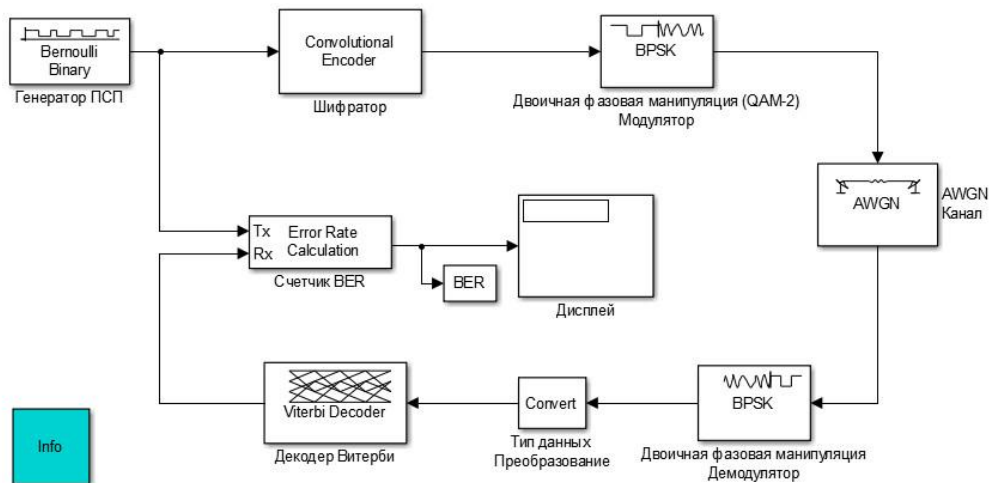


Рис. 2.10. Модель сверточного декодера Витерби при «Жестком решении»

На рисунке 2.11 представлен график зависимости коэффициента битовых ошибок от отношения сигнала к шуму  $BER = f\left(\frac{E_s}{N_0}\right)$  для жесткого и мягкого принятых решений сверточного декодирования последовательного метода Витерби.

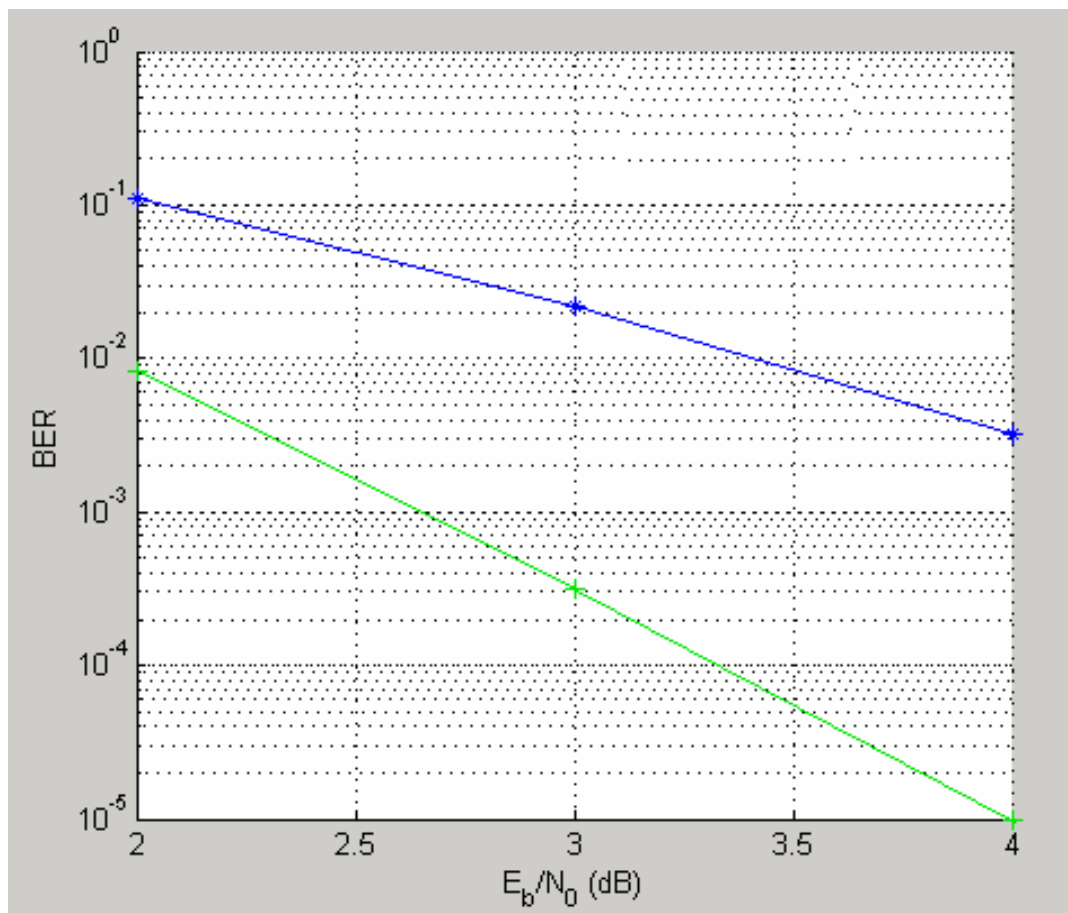


Рис. 2.11. График зависимости коэффициента битовых ошибок от отношения сигнала к шуму ( $BER = f(\frac{E_s}{N_0})$ ) для жесткого (синяя линия) и мягкого (зеленая линия) принятий решений сверточного декодирования последовательного метода Витерби.

Из рисунка 2.11 графика  $BER = f(\frac{E_s}{N_0})$  видно, что при «мягком решении» декодирование проходит лучше, чем при «жестком решении» т.е. при «мягком решении» количество битовых ошибок меньше, чем при «жестком решении».

В результате проделанной работы было проделано следующее, а именно:

- Проведен обзор метода сверточного декодирования на основе последовательного алгоритма Витерби;
- В программе MatLab/Simulink реализована модель сверточного декодирования на основе последовательного алгоритма Витерби;
- Проведено исследование основных технических характеристик декодирования алгоритма Витерби;
- Проанализировано результаты моделирования в MatLab/Simulink;
- Разработана методика проведения исследования основных технических характеристик алгоритма Витерби.

#### **2.4. Применение статистических критериев при решении задач обнаружения в радиолокации**

Под оптимальной обработкой в радиолокации понимают такую операцию над входной реализацией, приводящей к повышению вероятности правильно обнаружения полезного сигнала, как правило, известной формы, при условии наличия во входной реализации шума в виде случайного процесса с известным или неизвестным законом распределения.

Основной задачей радиотехники является приём, передача и обработка информации с использованием в качестве переносчика – радиосигнала. Главное требование, предъявляемое к радиотехническим системам – получение своевременной и достоверной информации от источника к потребителю. Однако этому мешает физика принципов работы приёмопередающих устройств и среды распространения сигнала, суть которой

заключается во флюктуации физических параметров системы и случайным значением принимаемого сигнала, имеющего шумовую составляющую, также относящуюся к стохастическим процессам.

На текущий момент, самый эффективный способ различения полезных сигналов на фоне шумов и помех является оптимальная обработка, реализуемая, как правило, сравнением принимаемой входной реализации с априорно известной формой полезного сигнала. При этом шумы, которые по своей природе процесс слабокоррелированный, вносят меньший вклад в величину, показывающую степень этого сравнения и называющуюся коэффициентом корреляции. Таким образом, любая задача обнаружения сводится к проверке минимум двух гипотез. В общем случае задача обнаружения состоит из двух гипотез:  $H_0$  – сигнал отсутствует на входе приёмного устройства,  $H_1$  – сигнал присутствует на входе приёмного устройства. Различные алгоритмы обнаружения обеспечивают различную вероятность правильного обнаружения  $P\{d_1/H_1\}$  при различных прочих статистических параметрах. Для сравнения эффективности алгоритмов обнаружения существуют критерии, а так как обрабатываются вероятностные величины, то характер этих критериев статистический. Иными словами критерий можно определить как мерло сравнения.

### **Статистические критерии обнаружения**

Большая часть алгоритмов обнаружения радиолокационных целей включают в себя следующие этапы:

1. Прием входной реализации
2. Формирование порога на основе априорной или апостериорной информации.
3. Оптимальная фильтрация входной реализации
4. Принятие решения о наличии сигнала/цели

При этом очередность приёма входной реализации и формирования порога зависит непосредственно от типа алгоритма. Алгоритмы, формирующие порог на основе апостериорной информации о принятой входной реализации называют адаптивными [1]. Критерий выбирается эмпирически исходя из типа задачи. Например: при выборе места работы обычно рассматривают два критерия:

- Максимум отношения заработанных денег к затраченной силе.
- Максимум удовольствия, получаемого от работы.

К сожалению, современные реалии ставят в приоритет такого специалиста, навыки которого позволяли бы как можно быстрее выпустить продукцию и максимизировать

прибыль компании. И зачастую второй критерий либо отбрасывается, либо при анализе ситуации ему присваивается низкий приоритет. Показатель, в данном случае, определяющий приоритет критериев, называется его мощностью. В математической статистике мощность критерия определяется, как вероятность не совершить ошибку второго рода при принятии решения. В нашем случае ошибка второго рода — это не устроится на оптимальную для себя работу, в общем же случае это ложное принятие за истину события соответствующего гипотезе  $H_0$ . Разумеется, универсальных критериев не существует. Так, например, критерий, имеющий наибольшую мощность, в решении одной задачи, в решении другой может оказаться наихудшим по этому показателю.

### Критерий минимального среднего риска (критерий Байеса)

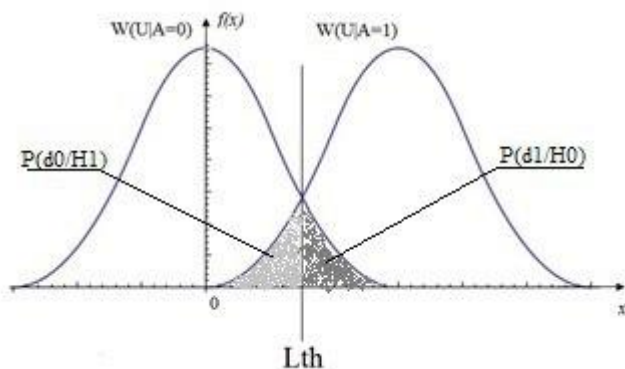


Рис.2.12. График распределения условной плотности вероятности наличия  $W(U|A=1)$  и отсутствия  $W(U|A=0)$  с вероятностями ошибок

Пусть  $A = 1$  соответствует наличию сигнала  $s(t)$ , а  $A = 0$  – его отсутствию. Множество решений  $d$  вырождается в два:  $d_0 \rightarrow A=1$  and  $d_1 \rightarrow A=0$ . При решении задачи бинарного обнаружения задача эквивалентна проверке гипотезы  $H_1$  о том, что  $A = 1$ , при альтернативной гипотезе  $H_0$  о том, что  $A = 0$ , а функция потерь переходит в квадратную матрицу:

$$C = \begin{vmatrix} C_{00} & C_{01} \\ C_{10} & C_{11} \end{vmatrix}$$

Таким образом, условный риск при  $A = 0$  равен  $r_0 = C_{00} P\{d_0/H_0\} + C_{01} P\{d_1/H_0\} = C_{00} (1 - P\{d_1/H_0\}) + C_{01} P\{d_1/H_0\}$ , а при  $A = 1$  равен  $r_1 = C_{10} P\{d_0/H_1\} + C_{11} P\{d_1/H_1\} = C_{10} (1 - P\{d_1/H_1\}) + C_{11} P\{d_1/H_1\}$ , где  $P\{d_1/H_1\}$  – вероятность

правильного обнаружения, а  $P\{d_1/H_0\}$  – вероятность ложной тревоги. Средний риск определяется как  $\bar{r} = qr_0 + pr_1$ , где  $q$  – априорная вероятность отсутствия сигнала, а  $p$  – априорная вероятность присутствия сигнала и определяет средние потери при ложной тревоге и пропуске цели [2]. Например: при использовании такого критерия для выставления порога срабатывания пожарной сигнализации, стоимость риска при ложной тревоге – вызов пожарной службы, а при пропуске – стоимость вещей в сгоревшей квартире или офисе. На рис.2.12 проиллюстрированы графики распределения плотности вероятности при наличии и отсутствии сигнала, также выделены зоны, площадь которых численно равна вероятностям ошибок при принятии решения. Ввиду стохастической природы явлений рассматриваемых в данном примере, распределения имеют ненулевую дисперсию. Согласно критерию минимального среднего риска лучшим алгоритмом обнаружения сигнала будет тот, у которого величина  $\bar{r}$  будет минимальна [2].

### **Критерий максимума апостериорной вероятности (максимального правдоподобия)**

Этот критерий получается из критерия минимального среднего риска при условии, что потери при совершении ошибки обратно пропорциональны вероятности их совершения  $C_{01} = 1/P\{d_0\}$ ,  $C_{10} = 1/P\{d_1\}$ . При этом порог оптимального обнаружителя выставляется таким образом, чтобы минимизировать сумму вероятностей ошибок  $P_{\text{ош}} = P\{d_0/H_1\} + P\{d_1/H_0\}$  (см рис.2).

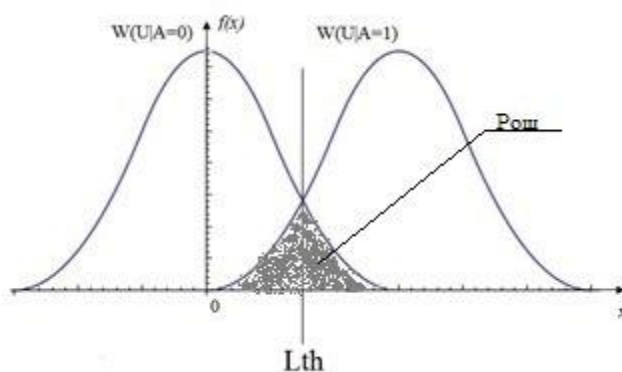


Рис.2.13. График распределения условной плотности вероятности наличия  $W(U|A=1)$  и отсутствия  $W(U|A=0)$  с вероятностью ошибки

### **Двухпороговый критерий Вальда**



В случаях, когда большую роль играет время наблюдения за процессом, например при наличии нескольких каналов и одного обнаружителя или круговом обзоре РЛС, применяют критерий последовательной проверки гипотез Вальда также известный под названием двухпороговый.

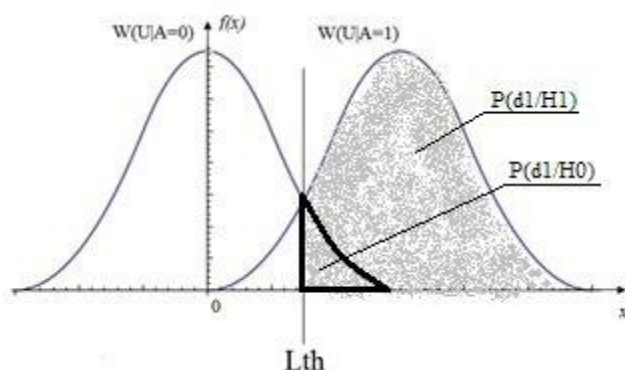


Рис.2.14. График распределения условной плотности вероятности наличия  $W(U|A=1)$  и отсутствия  $W(U|A=0)$  с вероятностью правильного обнаружения и вероятностью ложной тревоги

По этому критерию область определения вероятности делится на три подобласти, разделяемыми двумя порогами, определяемыми вероятностями правильного обнаружения

$$l_{low} = \frac{1 - P\{d_1/H_1\}}{1 - P\{d_1/H_0\}}, \quad l_{high} = \frac{P\{d_1/H_1\}}{P\{d_1/H_0\}}$$

и ложной тревоги (см.рис 3):

Критерий Вальда является оптимальным в смысле минимизации среднего времени наблюдения по большому количеству экспериментов [4]. Так как наиболее предпочтительным для радиолокации является сокращение длительности процедуры обнаружения, современные реалии ведут к всё более активному использованию этого критерия [5].

### Критерий Неймана-Пирсона

Большим минусом критериев Байесовского класса является необходимость априорного знания элементов матрицы потерь. Например: при пропуске вражеского бомбардировщика на союзную территорию стоимость рисков не поддается исчислению. В критерии Неймана-Пирсона фиксируется время обнаружения. Оптимальным будет алгоритм с максимальной вероятностью правильного обнаружения  $P\{d_1/H_1\}$ , при условии, что вероятность ложной тревоги  $P\{d_1/H_0\}$  не превышает заданной величины

[6].

В виду того, что критерий Неймана-Пирсона не требует знания априорных вероятностей ситуаций  $A = 1$  и  $A = 0$ , в радиолокации его используют одним из основных [5]. При разработке обнаружителей очень важно осознанно выбирать критерий оптимальности, ведь, как уже упоминалось ранее, каждый критерий имеет максимальную мощность в какой-либо определенной ситуации и применение иных может привести к нежелательным последствиям.

## **2.5. Анализ эффективности пеленгования сканирующих по углу источников СВЧ излучения на загоризонтных морских трассах. Неравенства Крамера-Рао. Информация Фишера.**

На маневренных трассах в различных районах океана и морей наиболее вероятным является прием сигналов сканирующих по азимуту остронаправленных источников излучения (судовых или береговых обзорных радиолокаторов). Задачей систем пеленгования является определение угловых координат таких радиолокаторов. В работах [1-5] проведен анализ статистической модели поля сканирующего по углу загоризонтного СВЧ источника, учитывающей свойства функции пространственной когерентности (ФПК) поля остронаправленного источника на загоризонтных морских трассах [6-8]. В данной работе на основе такой модели проведен анализ эффективности пеленгования источников излучения с остронаправленной антенной, сканирующей по азимуту. Оценена величина дополнительной погрешности пеленгования, обусловленная сканированием источника.

Считая диаграмму направленности антенны источника гауссовой, распределение поля в раскрыве передающей антенны, соответствующее ее обратному преобразованию Фурье, можно записать в виде

$$I_T(\rho_0, \alpha) = \exp\left[-\rho_0^2/a_T^2 + i k \alpha \rho_0\right], \quad (2.31)$$

где  $a_T^2 = 4 \ln 2 / k^2 \Theta_{II}^2 = 2,77 / k^2 \Theta_{II}^2$  - квадрат половины эффективной ширины раскрыва передающей антенны,  $\Theta_{II}$  - ширина диаграммы направленности источника излучения на уровне - 3 дБ (в радианах).

Нормированную функцию когерентности рассеянной составляющей поля сканирующего по углу источника в плоскости приемных апертур пеленгатора можно представить в виде [2]

$$\Gamma_{\phi}(\rho_1, \rho_2, \alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{\Pi_T} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha k a_T}{\Pi_T}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\alpha k a_T}{2}\right)^2 - \left(\frac{\Delta\rho}{l_{\rho}\Pi_T}\right)^2\right\} \times$$

$$\left[1 + (\Pi_T^2 - 1) \left(1 - \left(\frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2}\right)^2\right)\right] - i\alpha \left(\frac{2\Delta\rho k a_T^2}{l_{\rho}^2 \Pi_T^2}\right) \left(\frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2}\right) + ik \frac{\rho \Delta\rho}{2D},$$

(2.32)

где  $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$ ,  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ ,  $\Pi_T^2 = 1 + a_T^2/l_{\rho}^2$ ,  $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$ ,  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ ,  $D$  - длина трассы  $l_{\rho}$  и  $\gamma$  являются параметрами ФПК и соответствуют интервалу пространственной корреляции поля и коэффициенту эллиптичности ФПК [6-8].

Для оценки угловых координат используются два основных типа пеленгаторов с амплитудным и фазовым антенными датчиками [9]. Амплитудный антенный датчик состоит из двух направленных антенн со смещенными фазовыми центрами и диаграммами направленности, одинаковыми по форме, но разнесенными на угол  $\Delta\Theta$ . Фазовый антенный датчик состоит из двух слабонаправленных антенн, разнесенных на расстояние  $L$  поперек трассы. Для фазового датчика апертурные функции слабонаправленных ( $a_R \ll l_{\rho}$ ) приемных антенн можно записать как

$$I_{1,2}(\rho, \Theta) = \delta(\rho \pm L/2) \exp(ik \Theta \rho),$$

(2.33)

где  $L$  - база (расстояние между антеннами), полагая  $L^2 \ll D$  (длина трассы);  $\Theta$  - пеленг, то есть угол между нормалью к базе и направлением на источник.

Используя (2), (3) и нормированную функцию когерентности суммарного поля, равную взвешенной сумме (2) и  $\Gamma_0$  - ( $\Gamma_{\phi}(\dots)$  при  $l_{\rho} \rightarrow \infty$ )

$$\Gamma_{\Sigma} = (\Gamma_{\phi} + g^2 \Gamma_0) / (1 + g^2),$$

(2.34)

где  $g^2$  - параметр когерентности, равный отношению средней интенсивности регулярной и случайной составляющих при использовании ненаправленной передающей антенны, можно получить выражение для элементов корреляционной матрицы сигналов на выходе фазового датчика [3]

$$R_{jm}(\alpha_1, \alpha_2) = \overline{U_j(\alpha_1)U_m^*(\alpha_2)} = \frac{1}{1+g^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\alpha ka_T}{2}\right)^2 + ik\Theta\alpha\right] \times$$

$$\left\{ \frac{1}{\Pi_T} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha ka_T}{\Pi_T}\right)^2 - \left(\frac{L}{l_\rho \Pi_T}\right)^2 \left(1 + (\Pi_T^2 - 1) \left(1 - \left(\frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2}\right)^2\right)\right)\right] - \right.$$

$$\left. - i\alpha \frac{2Lka_T^2}{l_\rho^2 \Pi_T^2} \left(\frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2}\right)\right] + g^2 \exp\left[-\frac{1}{2}(\alpha ka_T^2)^2\right]\}, j, m = 1;2$$

(2.35)

Для амплитудного датчика апертурные функции антенн могут быть записаны как

$$I_{1,2}(\rho, \Theta_{1,2}) = \exp\{-(\rho^2/a_R^2) + ik\Theta_{1,2}\rho\}, \quad (2.36)$$

при этом  $\Theta = (\Theta_1 + \Theta_2)/2$  - угол между направлением на источник и равносигнальным направлением приемных антенн (пеленг);  $\Delta\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$  - угловое разнесение двух приемных антенн. Матрица корреляционных функций сигналов для амплитудного датчика имеет вид [3]

$$R_{jm}(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{1+g^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\alpha ka_T}{2}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\Theta ka_R}{2}\right)^2\right] \times$$

$$\left\{ \frac{1}{\Pi_T} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{ka_T \Pi_R}{\Pi_{TR}} \left(\alpha - \Theta \frac{2a_R^2(1-\gamma^2)}{\Pi_R^2 l_\rho^2 (1+\gamma^2)}\right)\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{\Theta ka_R}{\Pi_R}\right)^2 - ik\Delta\Theta \frac{k^2 a_R^2 \Pi_T^2}{8D \Pi_{TR}^2} \times \right.\right.$$

$$\left. \left(\Theta - \alpha \frac{2a_T^2}{l_\rho^2 \Pi_T^2} \left(\frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2}\right)\right)\right] + g^2 \exp\left[-\frac{1}{2}(\alpha ka_T)^2 - \frac{1}{2}(\Theta ka_R)^2 - ik\Delta\Theta \Theta \frac{k^2 a_R^4}{8D}\right]\},$$

(2.37)

где  $\Pi_R^2 = 1 + 2a_R^2/l_\rho^2$  - потери усиления приемной антенны,

$$\Pi_{TR}^2 = \Pi_T^2 \Pi_R^2 - \frac{4a_T^2 a_R^2}{l_\rho^4} \left(\frac{1-\gamma^2}{1+\gamma^2}\right)^2 \quad (2.38)$$

- совместные потери усиления передающей и приемной антенн при наличии только рассеянной составляющей поля.

Для анализа работы измерительных систем большое значение имеет оценка их потенциальных возможностей. Потенциальная точность оценки измеряемого параметра определяется минимальной величиной дисперсии и дает нижнюю границу чувствительности и достижимой точности измерения.

Потенциальная точность измерения (пеленгования) независимо от способа получения оценки может быть определена с помощью неравенства Крамера-Рао [10 - 13]. Неравенство Крамера-Рао является одним из немногих строгих, сравнительно простых и наглядных средств сравнения систем оценки параметров и исследования их потенциальных возможностей. Оценка, для которой неравенство преобразуется в равенство, является наиболее эффективной. Для несмещенной оценки или оценки с постоянным смещением из неравенства Крамера-Рао следует, что дисперсия оценки не может быть меньше величины, обратной информации Фишера.

Таким образом, информация Фишера является количественной мерой предельной точности оценки. Информация Фишера может быть определена как величина, пропорциональная отношению сигнал-шум по мощности и кривизне нормированной корреляционной функции полезного сигнала по оцениваемому параметру в ее максимуме [11-14]

$$J = -2q \left[ \frac{\partial^2 R(\Theta)}{\partial \Theta^2} \right] \Bigg|_{\Theta=0}, \quad (2.39)$$

где  $q$  - параметр обнаружения (энергетическое отношение сигнал-шум на выходе системы пространственно-временной обработки сигналов на фоне пространственно-временного белого шума).

Сигналы загоризонтного источника при прохождении через случайно-неоднородную среду подвергаются пространственно-временным искажениям. Задачи построения теории оценок параметров сигналов, прошедших через статистически неоднородную среду, и оценки предельных возможностей систем с учетом условий распространения еще требуют своего решения [13]. В равной мере эти задачи нерешены для распространения пространственных сигналов (полей).

В настоящее время имеется несколько диссертационных работ, посвященных исследованию точности пеленгования в условиях пространственно-временных и частотных искажений сигналов. Полученные результаты обобщены в работе [15]. В большинстве этих работ рассматриваются сигналы, представляющие собой аддитивную смесь регулярного сигнала и стационарного нормального узкополосного случайного

процесса с нулевым средним и заданной пространственной корреляционной функцией. В свою очередь случайная составляющая смеси рассматривается как суперпозиция двух независимых флуктуационных процессов: внутренних шумов приемных каналов и случайной составляющей сигнала, обусловленной неоднородностью среды, в которой происходит распространение волн. В этом случае возможен анализ точности пеленгования лишь при наличии регулярного сигнала. В некоторой степени такой подход оправдан, если угловой энергетический спектр случайного (рассеянного) сигнала широк по сравнению с требуемой точностью пеленгования, что позволяет приравнять его к шумовой составляющей.

В работе [15] рассмотрен более общий случай, учитывающий возможность пеленгования и по чисто рассеянному сигналу. Здесь отношение суммарной мощности сигнала к мощности шума в приемном канале представлено в виде  $q = (1 + g^2) q_{\phi}$ , где  $q_{\phi}$  - отношение сигнал-шум для рассеянного сигнала.

Почти все работы посвящены анализу точности пеленгования в случае, когда максимум диаграммы направленности источника ориентирован строго на пеленгатор и источник не сканирует. Наиболее полное исследование точности пеленгования загоризонтного источника по его боковому излучению при отвернутой ДН источника проведено в работе [9]. Здесь показано, что наибольшая точность пеленгования может быть достигнута, когда максимум источника строго направлен на пеленгатор ( $\alpha = 0$ ). При сканировании источника из-за искажений сигнала момент времени, когда ДН источника направлена на пеленгатор, известен с некоторой погрешностью. В работе [9] под ним понимают момент времени, когда амплитуда принимаемого сигнала максимальна. Экспериментальные исследования, проведенные в ТУСУР в 1987 г. на трассах Охотского радиофизического полигона со специально организованной передачей на приемный пункт сигнала «метки», соответствующего максимуму ДН источника, показали, что эти моменты отличаются. По предварительным оценкам величина отклонения «метки» от момента максимума амплитуды достигает половины ширины мгновенной диаграммы.

Для определения дисперсии эффективной оценки пеленга в условиях неопределенности положения максимума диаграммы сканирующего источника  $\alpha$  необходимо использование информационной матрицы Фишера ( $2 \times 2$ ). Тогда информация Фишера относительно пеленга  $\Theta$  (при неизвестном  $\alpha$ ) может быть получена как

$$J = J_{\Theta\Theta} - J_{\Theta\alpha}^2 / J_{\alpha\alpha}, \quad (2.40)$$

где  $J_{ij}$  — элементы информационной матрицы Фишера.

Для простоты полагаем  $g = 0$ , то есть рассматриваем случай пеленгования по чисто рассеянному сигналу. Это оправдано, так как при загоризонтном распространении отклонения углов прихода для флуктуационной компоненты значительно больше, чем для когерентной [15], и основными источниками ошибок являются быстрые флуктуации. Также считаем, что точность пеленгования при приеме одной реализации мгновенной диаграммы определяется лишь пространственными искажениями сигналов. Так как речь идет о потенциальной точности, полагаем, что неоднозначность пеленгования, свойственная фазовым пеленгаторам, каким-либо образом устранена.

Значения  $J_{ij}$  в выражении (10) определяем по формуле (9), используя соответствующие частные производные величин (5) и (7) по переменным  $\Theta$  и  $\alpha$ . Величины информации Фишера относительно пеленга  $\Theta$ , когда  $\alpha$  известно, получим в виде

$$J_{\Theta\Theta}^{\Phi} = 2q_{\Phi} k^2 L^2 \exp\left\{-\left(\frac{L}{l_{\rho} \Pi_T}\right)^2 \left(1 + (\Pi_T^2 - 1) \left(1 - \left(\frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2}\right)^2\right)\right)\right\}, \quad (2.41)$$

$$J_{\Theta\Theta}^A = 2q_{\Phi} \frac{k^2 a_T^2}{\Pi_R^2} \left[1 + \frac{4a_T^2 a_R^2 (1 - \gamma^2)}{\Pi_{TR}^2 l_{\rho}^4 (1 + \gamma^2)}\right] \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\Theta k a_R}{2}\right)^2\right\}, \quad (2.42)$$

для фазового и амплитудного пеленгаторов соответственно. Обратные информации Фишера (11) и (12) величины определяют дисперсии эффективных оценок пеленга загоризонтного источника с использованием фазового  $\sigma_{opt\Phi}^2$  и амплитудного  $\sigma_{optA}^2$  пеленгаторов. Видно, что величины  $\sigma_{opt}^2$  для фазового и амплитудного пеленгаторов зависят от параметров самого пеленгатора ( $q_{\Phi}, L, a_R, \Delta\Theta$ ), параметров источника ( $k, a_T$ ) и характеристик канала распространения ( $l_{\rho}, \gamma$ ). Так, например, дисперсия эффективной оценки пеленга для амплитудного и фазового пеленгаторов с увеличением  $\gamma$  возрастает, кроме того, при амплитудном пеленговании такая зависимость от  $\gamma$  проявляется сильнее.

Величины  $\sigma_{\phi}^2$  и  $\sigma_A^2$ , учитывающие дополнительную погрешность оценки пленга за счет неопределенности  $\alpha$  при сканировании источника, определяем как обратные величинам  $J_{\phi}$  и  $J_A$ , вычисленным с использованием формулы (10). Затем для фазового и амплитудного пеленгаторов оцениваем величины относительной эффективности оценки пленга как

$$\sigma_{opt\phi}^2 / \sigma_{\phi}^2 = 1 / (1 + P_{\phi}), \quad \sigma_{optA}^2 / \sigma_A^2 = 1 - P_A, \quad (2.43)$$

где

$$P_{\phi} = \frac{4h^2 d_{\phi}^2 \left( \frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2} \right)^2}{1 + 2h^2}, \quad (2.44)$$

$$P_A = \frac{4h^2 d_A^2 \left( \frac{1 - \gamma^2}{1 + \gamma^2} \right)}{(1 + 2h^2)(1 + 2d_A^2)}, \quad (2.45)$$

$$h = a_T / l_{\rho}, \quad d_{\phi} = L / l_{\rho}, \quad d = a_R / l_{\rho}.$$



Относительная эффективность оценки пеленга характеризует величину превышения дополнительной погрешности пеленгования по сравнению с  $\sigma_{opt}^2$ .

На рис.1 - 8 представлены результаты расчета величины относительной эффективности оценки пеленга для различных величин  $\gamma$  для случая слабонаправленной ( $h = 0,1-1$ ) и сильнонаправленной антенны источника ( $h = 1-10$ ) для малых ( $d_\phi, d_A = 0,1-1$ ) и больших искажений сигналов ( $d_\phi, d_A = 1-10$ ). Результаты расчета эффективности фазового пеленгования даны на рис.1 - 4, а амплитудного - на рис.5 - 8. Полученные зависимости необходимы для проектирования систем определения угловых координат. Они позволяют оценить ожидаемую погрешность пеленгования по априорным сведениям о пространственных характеристиках загоризонтных каналов ( $l_\rho$  и  $\gamma$ ) и выбрать соответствующие параметры пеленгаторов.

Из результатов расчета следует, что как при амплитудном, так и при фазовом пеленговании сканирующего источника значительное влияние на погрешность пеленгования оказывает дополнительная неопределенность  $\alpha$ . Величина превышения этой составляющей погрешности над флуктуационной сильно зависит от параметров  $h, d$  и  $\gamma$ . С увеличением параметров  $d$  или  $h$  величина дополнительной погрешности пеленгования увеличивается.

При фазовом пеленговании характер зависимости  $\sigma_{opt}^2 / \sigma_\phi^2$  от  $h$  и  $d$  различен (см. рис.1 и 2), а при амплитудном одинаков (см.рис.5 и 6) и совпадает с зависимостью от  $h$  при фазовом пеленговании. Это, очевидно, объясняется теоремой взаимности, так как передающая и приемные антенны при амплитудном пеленговании находятся в одинаковых условиях. Кроме того, при тех же параметрах эффективность пеленгования для амплитудного пеленгатора примерно в два раза выше, чем для фазового (см. рис.3 и 4).

Интересна зависимость эффективности пеленгования от величины  $\gamma$  (см. рис.3, 4, 7, 8). Как при амплитудном, так и при фазовом пеленговании с увеличением  $\gamma$  эффективность пеленгования улучшается, то есть влияние дополнительной погрешности за счет неопределенности  $\alpha$  на дисперсию оценки пеленга уменьшается. При малых искажениях сигналов ( $d < 0,5$ ) или слабонаправленных источниках ( $h < 0,5$ ) дополнительной погрешностью пеленгования можно пренебречь при  $\gamma > 0,5$ . Но для больших  $h$  или  $d$  дополнительная погрешность значительно

ухудшает эффективность пеленгования (см. рис.4 и 8) даже при  $\gamma > 0,8$ . Для амплитудного пеленгатора (см. рис.8) ухудшение эффективности пеленгования не так велико.

Случай  $\gamma = 0$  соответствует представлению модели канала распространения в виде хаотического экрана, подобно [9], и также может быть проанализирован с помощью графиков рис. 3, 4, 7, 8. Но, к сожалению, сравнить эти результаты с выводами [9] не представляется возможным, так как там не рассматривалась величина дисперсии эффективной оценки пеленга.

Экспериментальные оценки величин относительной эффективности фазового пеленгования загоризонтного сканирующего источника были получены по результатам обработки 40 сеансов измерений. Эмпирические оценки зависимостей  $\sigma_{opt}^2 / \sigma^2$  от  $\gamma$  и  $l_p$  приведены на рис.9 и 10. Установлено, что в 50% случаев величина дополнительной погрешности пеленгования в два раза превышала флуктуационную составляющую погрешности. Характер экспериментальных зависимостей от  $\gamma$  и  $l_p$  соответствует расчетным. При увеличении  $\gamma$  экспериментальные оценки величин  $\sigma_{opt}^2 / \sigma^2$  увеличиваются (см. рис.9). В случае, когда интервал корреляции превышал базу фазового пеленгатора  $l_p > 5,2$  м, величина дополнительной погрешности пеленгования, обусловленная неопределенностью  $\alpha$ , была наименьшей, но превышала флуктуационную составляющую погрешности пеленгования на 25%.

Погрешность пеленгования может быть уменьшена, если принять меры к уменьшению дополнительной составляющей погрешности. Для этого при проектировании пеленгаторов необходимо принять меры по оценке положения максимума диаграммы излучения источника. Например, при фазовом пеленговании кроме оценки разности фаз сигналов с двух разнесенных антенн необходимо проводить оценку центра тяжести МД по огибающей пачки сигналов. Можно использовать и другие методы для более точной оценки  $\hat{\alpha}$ .

### 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

По функциональному принципу сети ЕСЭ разделяются на транспортные сети и сети доступа.

**Транспортной** является та часть сети связи, которая выполняет функции переноса (транспортирования) потоков сообщений от их источников из одной сети доступа получателям сообщений другой сети доступа.

**Сетью доступа сети связи** является та ее часть, которая связывает источник (приемник) сообщений с узлом доступа, являющимся граничным между сетью доступа и транспортной сетью.

Основные принципы системного подхода в области оптимального проектирования могут быть сформулированы следующим образом.

Система, состоящая из оптимальных частей, в общем случае не является оптимальной. Подмена оптимизации системы в целом оптимизацией по частям во многих случаях может привести к ошибочным выводам. Оптимизация по частям приведет к тем же результатам, что и оптимизация в целом, только в том случае, если параметры одной части системы не влияют на выбор параметров другой части, что на практике встречается относительно редко.

**Оптимизация системы** должна проводиться по количественно определенному и единственному критерию, который в математической форме отражает цель оптимизации. Критерий оптимальности, представленный в виде функции оптимизируемых параметров системы, называется целевой функцией. Наличие нескольких критериев оптимальности, которые, как правило, тем или иным способом связаны между собой, не позволяет довести процесс до логического завершения, а отсутствие количественно определенного критерия свидетельствует о недостаточном понимании разработчиком поставленной перед ним задачи.

Система должна оптимизироваться в условиях количественно определенных ограничений на оптимизируемые параметры. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что оптимальность системы всегда относительна, условна, так как зависит от условий оптимизации. Поэтому условия оптимизации должны достаточно точно соответствовать реальной массе и т.д. **Внутренние параметры** описывают систему с точки зрения разработчика. Такими параметрами для систем передачи являются: вид модуляции, тип кода, число ступеней преобразования, тип применяемых элементов и т.д. Уравнения связи между внешними и внутренними параметрами системы в аналитической форме, широко используемые в последующих главах, могут быть получены в результате:

1. Теоретических исследований (например, уравнения связи для помехозащищенности, пропускной способности, надежности и т.д.);

2. Техничко-экономических расчетов (например, уравнения связи для стоимости, приведенных затрат и т.д.);

3. Аппроксимация экспериментальных зависимостей или эмпирических данных (например, уравнения связи для вероятности ошибки, разборчивости речевых сигналов и т.д.);

имитационного моделирования системы или ее подсистемы на ЭВМ (например, уравнения связи для параметров системы синхронизации в зависимости от характера ошибок или помехозащищенности в зависимости от типа используемого кода).

**Задание на проектирование** составляется заказчиком совместно с генеральным проектировщиком, а по необходимости и с субподрядным и специализированными организациями на основе решений, принятых на этапе разработки технико-экономического обоснования (ТЭО).

В задании на проектирование указываются:

- наименование проектируемой линии и основания для ее проектирования и строительства новых или использования существующих сетевых узлов связи (СУС);

- направление линии передачи с указанием конечных узловых и промежуточных пунктов, в которых должны выделяться каналы связи;

- виды и объем информации, подлежащей передаче (телефонная, телеграфная и факсимильная связь, передача данных, Интернет, электронная почта, передача газетных полос, телевидение и вещание, роуминг мобильной радиосвязи и т.п.), приведенных к общему числу каналов тональной частоты (КТЧ), основных цифровых каналов (01ДК) или цифровых потоков различной иерархии;

- предварительные рекомендации по выбору цифровых систем передачи, типа кабеля и источников их поставки;

- рекомендации по топологии сети, элементом которой будет проектируемая линия передачи;

- требования по организации соединительных линий первичной сети и временных обходных связей на период освоения проектной мощности или завершения реконструкции;

- обоснование необходимости строительства технических и вспомогательных зданий, проектирования источников и сетей электро-, теплоснабжения и инженерных коммуникаций для них;

- требования к показателям надежности линии передачи и мероприятиям по их защите как от различного вида влияний, так и от несанкционированного доступа;

- взаимосвязь линии передачи с другими сооружениями ЕСЭ и ее составляющими;

- мероприятия на случай чрезвычайных ситуаций;
  - требования по организации эксплуатации линии передачи, экологии и охране окружающей среды;
- предварительные сведения о сейсмичности, вечной мерзлоте, группе.

### Основные этапы проектирования

При проектировании линии передачи решаются следующие задачи: Выбор трассы линии передачи.

Социально-экономическая характеристика конечных и промежуточных пунктов.

Обоснование и расчет потребного количества каналов. Выбор системы передачи и типа кабеля. Размещение регенерационных пунктов и др.

### Инженерный расчет показателей надежности ВОЛП

Исходные данные для расчета и основные расчетные соотношения

Требуемые показатели надежности (без резервирования) для местных (МПС), зонавых (ЗПС) и магистральных (СМП) участков первичной сети ЕСЭ РФ с максимальной протяженностью  $L_M$  приведены в табл. 1.1, 1.2 и 1.3 соответственно.

Таблица 3.1

Показатели надежности с протяженностью сети  $L_M = 200$  км

Показатель надежности	Канал ТЧ или ОЦК независимо от применяемой системы передачи	Канал ОЦК на перспективной цифровой сети	АЛТ
Коэффициент готовности $K_r$	> 0,997	> 0,9994	0,9987
Среднее время между отказами $T_o$ , ч	> 400	> 7000	> 2500
Время восстановления $T_v$ , ч	< 1,1	< 4,24	См. примечание

0,985, а аппаратуры - 0,995. Тогда на подземной кабельной линии должны обеспечиваться следующие показатели:

- коэффициент готовности - не менее 0,985;
- среднее время между отказами - не менее 340,5 ч;
- среднее время восстановления - не более 5,2 ч;
- плотность повреждений - не более 0,1823.

## Нормирование параметров цифровых каналов и трактов при проектировании СП и ЛП

### Общие принципы нормирования. Основные определения

Каналы и тракты проектируемых линий передачи должны отвечать определенным требованиям, предъявляемым к их параметрам, основными из которых являются: мощность шумов и вероятность ошибки. Для нормирования параметров цифровых каналов и трактов используются номинальные цепи, представляющие собой цифровые тракты определенной длины с установленным количеством оконечного и промежуточного оборудования.

### Основные нормируемые показатели качества функционирования цифровых каналов и трактов

К основным нормируемым показателям качества функционирования каналов и трактов относятся:

- верность передачи;
- задержка;
- фазовые флуктуации;
- проскальзывания,

Главный нормативный показатель - верность передачи.

Таблица 3.2. Максимальная продолжительность измерения коэффициента ошибок  $K_{ош}$  в зависимости от скорости передачи  $f$

$f$ , кбит/с	$K_{ош}$				
	$10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-10}$	$10^{-12}$	$10^{-14}$
64 (ОЦК)	16,0 с	26 мин	43,4 ч	180,8 сут	49,5 лет
2048 (ПЦТ)	0,5 с	48,8 с	1,4 ч	5,6 сут	1,5 года
34368 (ТЦТ)	30 мс	2,9 с	4,8 мин	8,1 ч	33,7 сут
155520 (СТМ-1)	6 мс	0,6 с	64,3 с	1,8 ч	7,4 сут
2488320 (СТМ-16)	0,4 мс	40 мс	4 с	6,7 мин	11,2 ч
39813120 (СТМ-256)	25 мкс	2,5 мс	0,25 с	25,1 с	41,9 мин



Рис. 3.1. Структурная схема участка регенерации

### Расчет участков волоконно-оптической линии передачи

Длины участков на волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) следует выбирать возможно большими с тем, чтобы уменьшить количество необслуживаемых регенерационных пунктов (НРП). Максимальная длина участка рассчитывается двояко: исходя из потерь в физической среде передачи и в зависимости от дисперсионных свойств этой среды.

Основные параметры оптических волокон (ОВ) волоконно-оптических кабелей, используемых при проектировании ЛП, приведены в табл. 5.4, где приняты следующие обозначения:  $\alpha$  - коэффициент затухания оптического волокна, дБ/км;  $\Delta F$  - относительная полоса пропускания оптического волокна - его широкополосность, МГц/км (для многомодовых волокон);  $\lambda$  - длина волны оптического излучения, мкм;  $\sigma$  - коэффициент хроматической дисперсии оптического волокна, пс/нм·км (для одномодовых волокон).

ОВ, отвечающее рекомендации МСЭ-Т	$\lambda_1$ , мкм	$\alpha$ , дБ / км	$\Delta F$ , МГц / км	$\sigma$ , пс/нм·км
G.651	0,85	2,5...3,0	500	—
	1,31	0,5...0,7	800	—
G.652	1,31	0,35...0,5	—	2,5...3,5
	1,55	0,22...0,25	—	17...19
G.653	1,31	0,35...0,5	—	17...19
	1,55	0,22...0,25	—	2,5...3,5
G.654	1,55	0,17...0,19	—	17...19
G.655	1,55	0,22...0,25	—	6...8

В техническом паспорте (сертификате) аппаратуры обычно указываются следующие параметры.

- Скорость передачи оптического сигнала  $V$ , Мбит/с.
- Длина волны источника излучения  $\lambda$ , мкм.
- Тип источника излучения.
- Ширина спектра источника излучения  $\Delta\lambda$ , мкм.
- Уровень излучаемой мощности  $P_{\text{ПЕР}}$ , дБм.
- Минимальный уровень приема  $P_{\text{ПР}}$  дБм.

Разность уровня передачи и минимального уровня приема называют энергетическим потенциалом системы

$$\mathcal{E} = P_{\text{ПЕР}} - P_{\text{ПРМИН}}$$

Для определения длины регенерационного участка составляется его расчетная схема, представленная на рис. 1.2.

На рисунке приняты следующие обозначения: ОС-Р — оптический соединитель разъемный; НРП — необслуживаемый регенерационный пункт; ППМ — приемопередающий оптический модуль, преобразующий оптический сигнал в электрический, восстанавливающий параметры последнего и преобразующий его в оптический (аппаратура окончания оптического тракта; ОС-Н — оптический соединитель неразъемный, ОВ — оптическое волокно. Как следует из рис. 5.4, затухание регенерационного участка равно

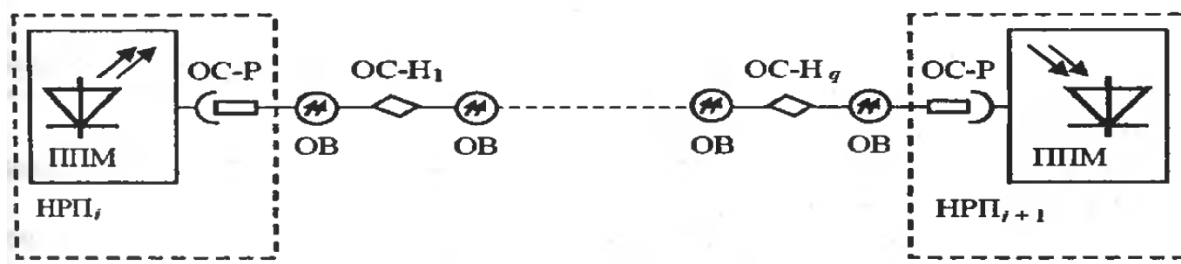


Рис. 3.2. Расчетная схема регенерационного участка ЦВОСП



№ п/п	Параметры	Обозначения	Единицы измерения	Значения параметра
1	Уровень мощности передачи оптического сигнала	$P_{пер}$	дБм	- 4
2	Минимальный уровень мощности приема оптического излучения	$P_{пр}$	дБм	- 35
3	Энергетический потенциал ЦВОСП	$\mathcal{E}$	дБ	31
4	Длина регенерационного участка	$l_{ру}$	км	24
5	Строительная длина оптического кабеля	$l_{стр}$	км	4
6	Количество разъемных соединений	$q_{рс}$	-	2
7	Затухание оптического сигнала на разъемном соединителе	$A_p$	дБ	0,5
8	Количество неразъемных соединений	$q$	-	7
9	Затухание оптического сигнала на неразъемном соединителе	$A_{нс}$	дБ	0,1
10	Коэффициент затухания оптического кабеля	$\alpha$	дБ/км	0,7

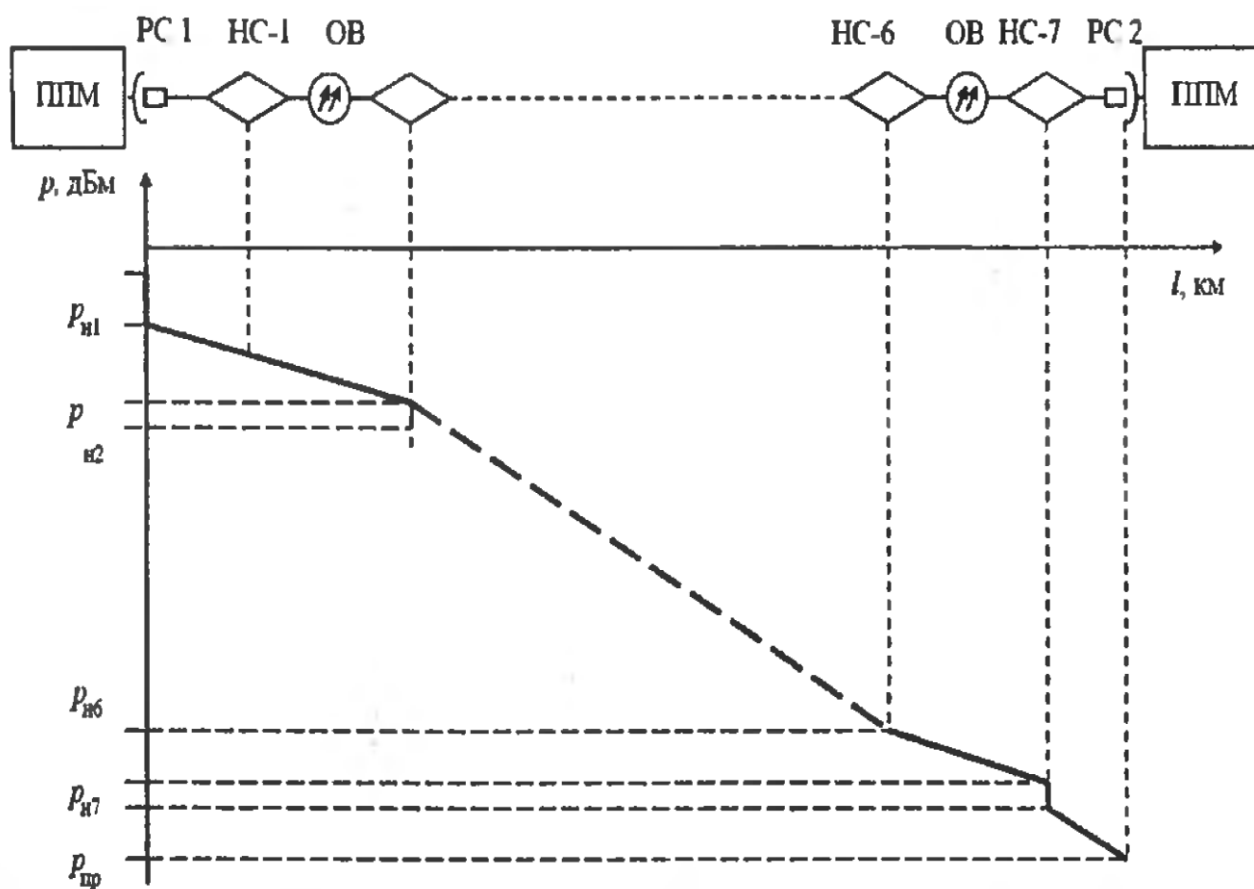


Рис.3.3. Диаграмма распределения энергетического потенциала

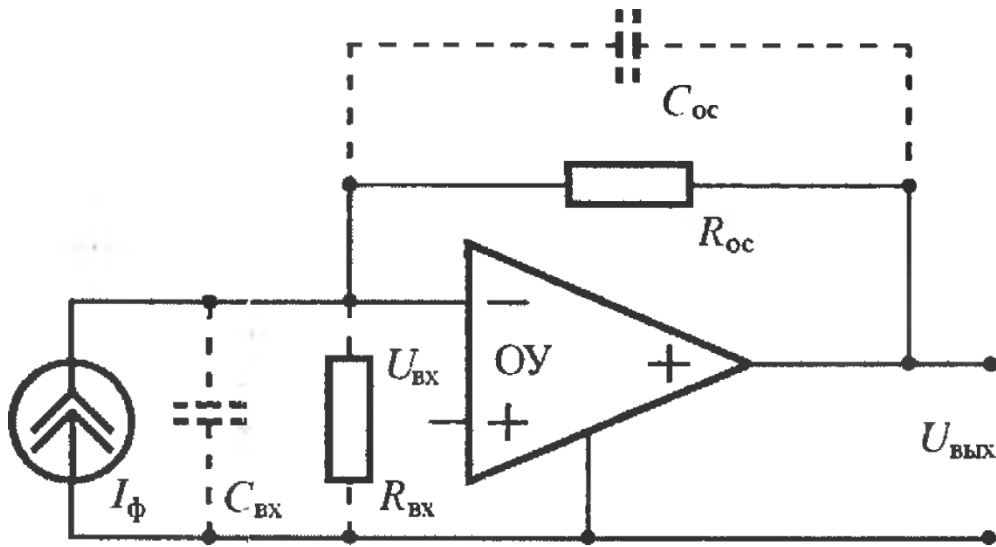


Рис. 3.4. Типовая схема усилителя фотодетектора

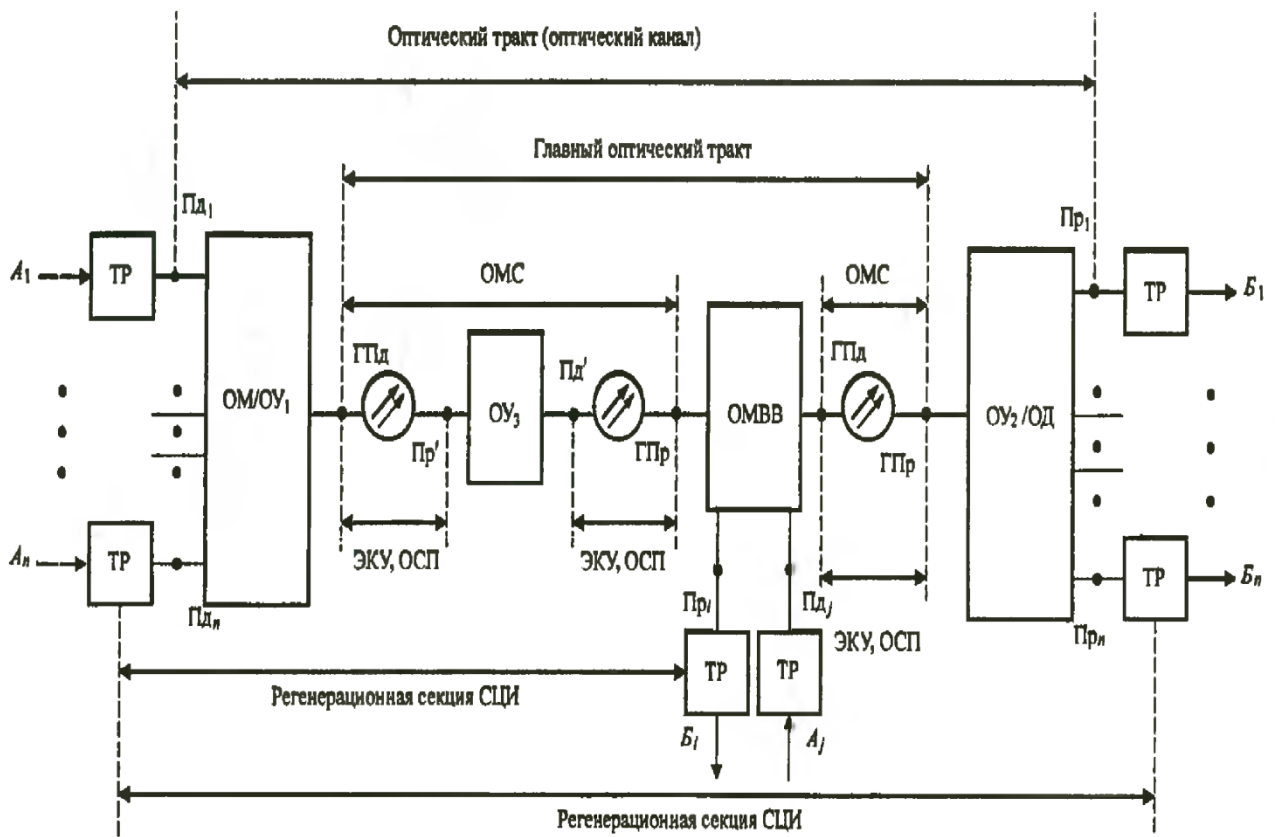


Рис. 3.5. Линейная сетевая структура ВОСП-СР (ВОЛС)

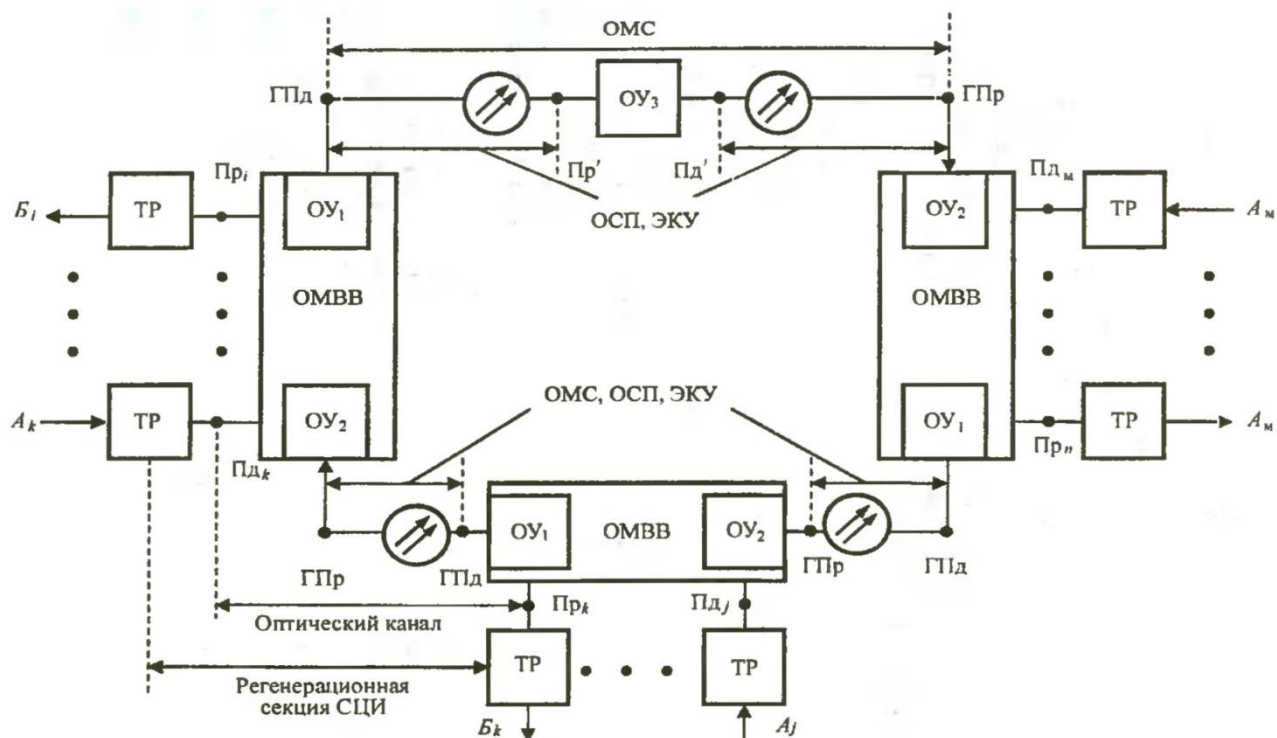


Рис. 3.6. Кольцевая структура ВОСП-СР (ВОЛС)

Система ВОСП-СР в основном нормируется по параметрам оптического стыка на входах и выходах в соответствии с ОСТ 45.104 и первой частью ОСТ 45.178 для одноканальных ВОСП. К нормируемым параметрам для каждого оптического канала дополнительно относятся:

- центральная частота (длина волны) оптического канала;
- расстояние между оптическими каналами;
- отклонение центральной частоты оптического канала;
- ширина линии излучения лазера.

Кроме того, к нормируемым параметрам оптического стыка на границах ЭКУ (они являются общими для всех оптических каналов) добавляются также:

- отношение оптических сигнал-шум в каждом оптическом канале;
- суммарная мощность оптического излучения, вводимая в ОВ;
- перекрываемое затухание;
- суммарная дисперсия;
- оптическая переходная помеха между оптическими каналами, максимум различия мощности в оптических каналах.

**Центральная частота** (длина волны) оптического канала определяется как центральная частота (длина волны) спектра оптического сигнала соответствующего оптического канала.

**Расстояние между оптическими каналами** определяется как разность между центральными частотами оптических каналов.

**Отклонение нейтральной частоты** оптического канала определяется как разность между номинальной и действительной центральными частотами оптического канала. При этом

во внимание принимаются все процессы, ведущие к изменению частоты источника излучения при соответствующей скорости передачи сигнала в оптическом канале. К таким процессам относятся:

- импульсное смещение частоты источника излучения (чирп-эффект);
- влияние скорости передачи информационного сигнала;
- эффект расширения спектра сигнала за счет самомодуляции фазы;
- влияние температуры и старения.

**Импульсным смещением** частоты источника излучения называется изменение центральной частоты спектра источника излучения во время действия импульса, модулирующего ток накачки лазера.

Самомодуляция фазы — модуляция фазы оптического сигнала вызванная нелинейными эффектами в оптическом волокне при больших значениях мощности оптического сигнала.

Ширина линии излучения лазер— ширина спектра оптического излучения [1].

### **3.2. Системы цифровой радиорелейной связи**

В России наиболее широкое распространение получили две технологии построения транспортной инфраструктуры оператора связи: на основе волоконно-оптических систем и на основе систем радиосвязи. Первые характеризуются очень высокой пропускной способностью, но при этом требуют серьезных изыскательских работ и времени на реализацию проекта. В связи с этим волоконная оптика нашла применение прежде всего у операторов междугородной и международной связи. Системы радиосвязи позволяют гибко и оперативно охватывать большие территории, но при этом имеют ограниченную пропускную способность, что во многом обусловлено количеством частотных назначений, выданных тому или иному оператору.

На протяжении уже многих лет одним из наиболее экономичных и быстрых способов организации радиопередачи информационно-транспортных потоков на большие расстояния остается радиорелейная связь. Причем, если раньше в основной своей массе магистральные линии, обеспечивающие такую связь, были аналоговыми, то сейчас им на смену пришли современные цифровые радиорелейные станции (ЦРРС), обладающие высокой пропускной способностью. Работают такие станции, как правило, в диапазоне частот 3,4-11,7 ГГц. Их пропускная способность составляет 155 Мбит/с и более, а передача сигналов ведется с использованием многопозиционных видов модуляции. Для ЦРРС магистральных и внутризональных линий характерно наличие системы телеобслуживания, программно поддерживающей уровень управления сетевыми элементами и сетью, а также обеспечивающей контроль, управление и техническое обслуживание оборудования. Со строительством высокоскоростных ЦРРС

связано ведущееся в настоящее время интенсивное освоение районов Крайнего Севера, которое требует серьезных инвестиций не только в создание технологических объектов, но и в построение телекоммуникационной составляющей. Выбор технологии построения транспортной инфраструктуры этого региона во многом предопределили его климатические и природные особенности. В частности, низкие температуры в зимний период, требующие специальных технологий защиты волоконно-оптических кабелей при их подвешивании на опоры (например, линий электропередач), наличие огромного количества водных преград (особенно в Ямало-Ненецком округе) и вечная мерзлота грунта серьезно затрудняют использование волоконной оптики в северных округах Тюменской области.

В сети связи Томской области доля радиорелейной связи составляет 60-70%. Преобладание радиорелейных систем над проводными и спутниковыми основывается на следующих факторах:

- большая площадь территории области - 314,4 тыс. км<sup>2</sup>;
- особенности рельефа: степень заболоченности Томской области достигает 40%, на долю речных долин приходится 1/5 всей территории области, лесные массивы занимают 63% территории;
- большие расстояния между населёнными пунктами,
- развитая нефте- и газодобывающая отрасль, требующая обеспечения связи на больших расстояниях и в труднодоступных районах, а также на протяжении всей трассы трубопроводов.

Наиболее крупными владельцами радиорелейных систем передачи информации на территории Томской области являются следующие организации:

- ООО «СибПТУС», обеспечивающая технологическую связь вдоль нефтепроводов, проходящих через Томскую область;
- ООО «Томсктрансгаз», обеспечивающая технологическую связь вдоль газопроводов, проходящих через Томскую область;
- ОАО «Сибирьтелеком», являющаяся оператором дальней связи на территории Томской области;
- операторы сотовой связи ОАО «Вымпелком» и ОАО «МТС».

Перед разработкой любого проекта следует рассмотреть все возможные альтернативные варианты. В качестве таковых в нашем случае возможен только один – аренда потоков у других операторов, поскольку заболоченность местности, большие расстояния и тяжелые климатические условия не позволяют даже рассматривать построение оптоволоконной системы связи. Вариант с арендой каналов для

организации ООО «Томсктрансгаз» является неприемлемым по следующим причинам: во-первых, точки доступа к другим операторам в некоторых местах расположены на значительном расстоянии от мест расположения аппаратуры «Томсктрансгаз», что приведет к необходимости проведения дополнительных строительных работ; во-вторых, не во всех пунктах доступа имеется достаточная пропускная способность, необходимая для «Томсктрансгаз»; в-третьих, аренда каналов в долгосрочной перспективе оказывается слишком дорогой по сравнению с модернизацией используемого сейчас оборудования «Трал 400/24».

Последним и наиболее важным условием необходимости проектирования собственной цифровой РРЛ становится независимость обеспечения технологической связи от внешних факторов.

#### Обзор радиорелейных линий связи

В состав любой радиорелейной станции входит следующее оборудование:

- 1) аппаратура уплотнения каналов;
- 2) аппаратура служебной связи,
- 3) телесигнализации и телеуправления;
- 4) приемопередающая аппаратура;
- 5) аппаратура систем автоматического резервирования стволов;
- 6) антенно-фидерные устройства;
- 7) оборудование систем гарантированного электропитания

Современный приемопередающий комплекс способен передавать от нескольких каналов тональной частоты до 34 Мбит/с при плездохронной цифровой иерархии (ПЦИ), и от потока STM-0 до STM-16 при синхронной цифровой иерархии (СЦИ).

В тех случаях, когда радиорелейная система передачи (РРСП) предназначена для передачи большого числа сигналов, она образуется несколькими приемопередающими комплексами, работающими в одном направлении на различных частотах. Каждый из таких комплексов сверхвысокочастотных приемопередатчиков принято называть стволом.

По пропускной способности различают следующие РРЛ:

- а) многоканальные, с числом каналов ТЧ свыше 300;
- б) средней емкости – от 60 до 300 каналов ТЧ
- в) малоканальные – меньше 60 каналов ТЧ.

По области применения РРЛС делятся на магистральные, протяженностью более 2,5 тысяч км, внутрizonовые – республиканского и областного значения протяженностью 250-1400 км, местные 50-200 км.

По способу разделения каналов РРЛС могут быть с частотным и временным разделением каналов, а по диапазону используемых частот – дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов.

Чтобы обеспечить радиорелейную связь в пределах прямой видимости, необходимо поднять антенны над уровнем земли на башнях или мачтах. Высоты антенных опор в зависимости от длины и профиля каждого пролета между соседними станциями могут достигать 120 м, строительство более высоких антенных башен становится экономически невыгодным.

Длина пролета между соседними РРС обычно от 30 до 55 км. В диапазонах частот выше 11 ГГц это значение может уменьшаться с повышением частоты. В отдельных случаях длина может быть уменьшена до 20 или 30 км из-за необходимости размещения РРС в заданном пункте, а также когда на трассе РРЛ имеются препятствия.

Ограниченность расстояния прямой видимости не следует рассматривать как сугубо отрицательный фактор. Именно за счет невозможности свободного распространения радиоволн на большие расстояния устраняются взаимные помехи между РРСП, а также возможно повторное использование частотного диапазона.

### **Основные проблемы организации связи**

Физические процессы, происходящие в канале связи, определяют изменения, которые претерпевает сигнал на пути от передатчика к приемнику.

*Во-первых*, на сигнал действуют *аддитивные помехи*. Для НЧ и СЧ систем такими помехами являются сигналы соседних по частоте радиостанций, атмосферные и индустриальные шумы. Для УВЧ и СВЧ радиорелейных систем решающее значение приобретают собственные внутренние шумы приемных устройств, а для систем космической радиосвязи к ним добавляются шумы космического происхождения (при нарушении правил электромагнитной совместимости возможно также влияние других радиосредств, работающих в совмещенном диапазоне частот).

*Во-вторых*, на сигнал в канале действуют *мультипликативные помехи*, обусловленные изменениями параметров канала как четырехполюсника.

Совместное воздействие аддитивных и мультипликативных помех определяет искажения сигнала. Величина искажений зависит от интенсивности помех и помехоустойчивых свойств системы связи. Любой канал связи вносит те или иные искажения. Вместе с тем передача считается неискажённой, если вносимые системой связи искажения не превышают установленных норм.

Электрические характеристики систем связи, определяющие искажения передаваемой информации, определяются на внутренних линиях РФ нормами ЕАСС, на международных линиях - рекомендациями МСЭ и Т.

Немаловажна ещё одна проблема. Загрузка диапазона радиочастот до 11 ГГц в настоящее время такова, что средства самой радиосвязи вынуждены работать в совмещенных диапазонах частот, а ведь в этом диапазоне работают еще и средства радиолокации, радионавигации, радиотелеметрии. Возникает серьезная и сложная проблема электромагнитной совместимости различных радиосредств, требующая решения не только в национальном, но и в глобальном масштабе.

### **Плезियोхронная цифровая иерархия**

Плезियोхронная цифровая иерархия была разработана в начале 80-х годов. Она делится на три различные иерархические цифровые наборы, или цифровые иерархии. В первой из них, принятой в США и Канаде, в качестве скорости сигнала первичного цифрового канала (ПЦК) -DS1 была выбрана скорость 1544 кбит/с (т.е. двадцать четыре цифровых телефонных канала 64 кбит/с). Во второй, принятой в Японии, использовалась та же скорость для DS1. В третьей, принятой в Европе и Южной Америке, в качестве первичной была выбрана скорость 2048 кбит/с (формально количество каналов - 32, но два канала используются для сигнализации и управления).

**Первая иерархия**, порожденная скоростью 1544 кбит/с, давала последовательность: DS1 -DS2 - DS3 - DS4 или последовательность вида: 1544 - 6312 - 44736 - 274176 кбит/с, что, с учетом скорости DS0, соответствует ряду коэффициентов мультиплексирования  $n=24$ ,  $m=4$ ,  $l=7$ ,  $k=6$ . Указанная иерархия позволяет передавать соответственно 24, 96, 672 и 4032 канала DS0.

**Вторая иерархия**, порожденная скоростью 1544 кбит/с, давала последовательность DS1 - DS2 - DS3 - DS4 или последовательность 1544 - 6312 - 32064 - 97728 кбит/с, что, с учетом скорости DS0, соответствует ряду коэффициентов мультиплексирования  $n=24$ ,  $m=4$ ,  $l=5$ ,  $k=3$ . Указанная иерархия позволяет передавать соответственно 24, 96, 480 и 1440 каналов DS0.

**Третья иерархия**, порожденная скоростью 2048 кбит/с, давала последовательность E1 - E2 -E3 - E4 - E5 или последовательность 2048 - 8448 - 34368 - 139264 - 564992 - кбит/с, что соответствует ряду коэффициентов  $n=30$  (32),  $m=4$ ,  $l=4$ ,  $k=4$ ,  $i=4$ , (т.е. коэффициент мультиплексирования в этой иерархии выбирался постоянным и кратным 2). Указанная иерархия позволяет передавать соответственно 30, 120, 480, 1920 и 7680 каналов DS0, что отражается и в названии ИКМ систем: ИКМ-30, ИКМ-120, ИКМ-480 и т.д..

Указанные иерархии, известные под общим названием плезियोхронная цифровая



иерархия PDH, или ПЦИ, сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 - Схемы цифровых иерархий: американская (АС), японская (ЯС) и европейская (ЕС)

Уровень цифровой иерархии	Скорости передачи, соответствующие различным схемам цифровой иерархии		
	АС: 1 544 кбит/с	ЯС: 1544 кбит/с	ЕС: 2048 кбит/с
0	64	64	64
1	1544	1544	2048
2	6312	6312	8448
3	44736	32064	34368
4	—	97728	139264

Параллельное развитие трех различных иерархий не могло способствовать развитию глобальных телекоммуникаций в мире в целом, поэтому комитетом по стандартизации ИТУ-Т или МСЭ-Т были сделаны шаги по их унификации и возможному объединению. В результате был разработан стандарт, согласно которому были стандартизованы три первых уровня первой иерархии (DS1-DS2-DS3), четыре уровня второй иерархии (DS1-DS2-DSJ3-DSJ4) и четыре уровня третьей иерархии (E1-E2-E3-E4) в качестве основных. Также были указаны схемы кросс-мультиплексирования иерархий, например, из третьей в первую и обратно. На рисунке 3.7 схематично представлен результат, полученный после стандартизации.

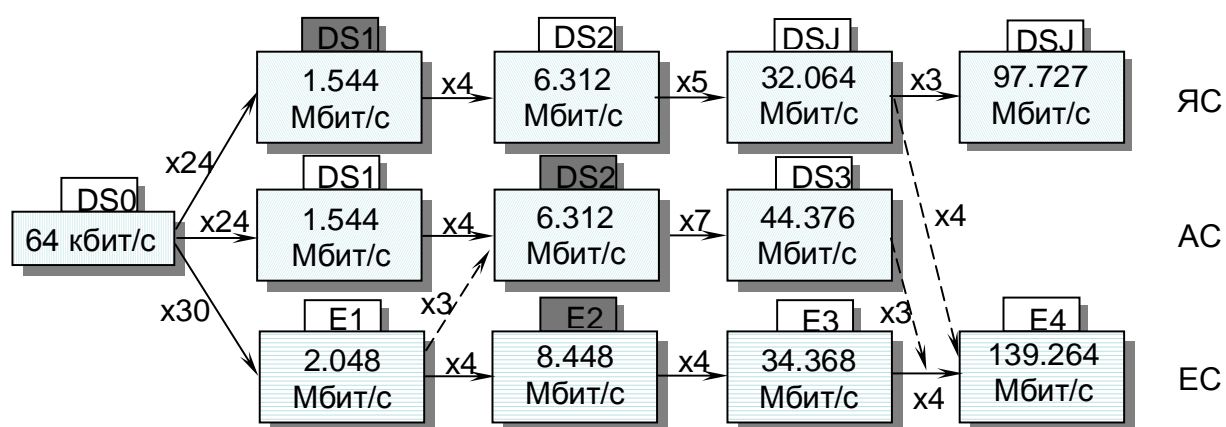


Рис. 3.7. Схема мультиплексирования и кросс-мультиплексирования в американской, японской и европейской цифровых иерархиях

Наличие стандартных скоростей передачи и фиксированных коэффициентов мультиплексирования позволило говорить о трех схемах мультиплексирования - американской, японской и европейской. При использовании жесткой синхронизации при приеме/передаче можно было бы применить метод мультиплексирования с

чередованием октетов или байтов, как это делалось при формировании цифровых сигналов первого уровня, для того, чтобы иметь принципиальную возможность идентификации байтов или групп байтов каждого канала в общем потоке. Однако учитывая, что синхронизация входных последовательностей, подаваемых на мультиплексор от разных абонентов/пользователей, отсутствует, в схемах второго и более высокого уровней мультиплексирования был использован метод мультиплексирования с чередованием бит (а не байт). В этом методе мультиплексор, например, второго уровня формирует выходную цифровую последовательность скоростью 6 Мбит/с - АС, ЯС (или 8 Мбит/с - ЕС) путем чередования бит входных последовательностей от разных каналов (для АС и ЯС это каналы Т1, а для ЕС - каналы Е1).

Так как мультиплексор не формирует структуры, которая могла бы быть использована для определения позиции бита каждого канала, а входные скорости разных каналов могут не совпадать, то используется внутренняя побитовая синхронизация, при которой мультиплексор сам выравнивает скорости входных потоков путем добавления или удаления нужного числа выравнивающих бит в каналы с относительно меньшими скоростями передачи. Благодаря этому на выходе мультиплексора формируется синхронизированная цифровая последовательность. Информация о вставленных/изъятых битах передается по служебным каналам, формируемым отдельными битами в структуре фрейма. На последующих уровнях мультиплексирования эта схема повторяется, добавляя новые выравнивающие биты. Эти биты затем удаляются/добавляются при демultipлексировании на приемной стороне для восстановления исходной цифровой последовательности. Такой процесс передачи получил название плезиохронного (т.е. почти синхронного), а цифровые иерархии АС, ЯС и ЕС соответственно название плезиохронных цифровых иерархий - PDH.

Кроме синхронизации, на уровне мультиплексора второго порядка также происходит формирование фреймов и мультифреймов, которые позволяют структурировать последовательность в целом. Формирование фреймов и мультифреймов и их выравнивание особенно важно для локализации на приемной стороне каждого фрейма, что позволяет в свою очередь получить информацию о сигнализации и кодовых группах контролирующих избыточных кодов CRC и информацию служебного канала данных.

Общая схема канала передачи с использованием технологии PDH даже в самом простом варианте топологии сети "точка - точка" на скорости 140 Мбит/с должна включать три уровня мультиплексирования на передающей стороне (для ЕС, например,

2→8, 8→34 и 34→140) и три уровня демультиплексирования на приемной стороне, что приводит к достаточно сложной аппаратурной реализации таких систем.

Еще одним недостатком систем передачи плездохронной цифровой иерархии является также то, что при нарушении синхронизации группового сигнала восстановление синхронизации первичных цифровых потоков происходит многоступенчатым путем, а это занимает довольно много времени.

Но самое главное, что заставило уже в середине 80-х годов XX в. искать новые походы к построению цифровых иерархий систем передачи, это почти полное отсутствие возможностей автоматически контролировать состояние сети связи и управлять ею. А без этого создать надежную сеть с высоким качеством обслуживания практически невозможно. Все эти факторы и побудили разработать еще одну цифровую иерархию.

### Синхронная цифровая иерархия

Новая цифровая иерархия была задумана как скоростная информационная автострада для транспортирования цифровых потоков с разными скоростями. В этой иерархии объединяются и разъединяются потоки со скоростями 155,520 Мбит/с и выше. Поскольку способ объединения потоков был выбран синхронный, то данная иерархия получила название синхронной цифровой иерархии (Synchronous Digital Hierarchy — SDH).

Для транспортирования цифрового потока со скоростью 155 Мбит/с создается синхронный транспортный модуль (Synchronous Transport Module) STM-1.

Модуль представляет собой фрейм (рамку)  $9 \cdot 270 = 2430$  байт. Кроме передаваемой информации (называемой в литературе полезной нагрузкой), он содержит в 4-й строке указатель (Pointer, PTR), определяющий начало записи полезной нагрузки.

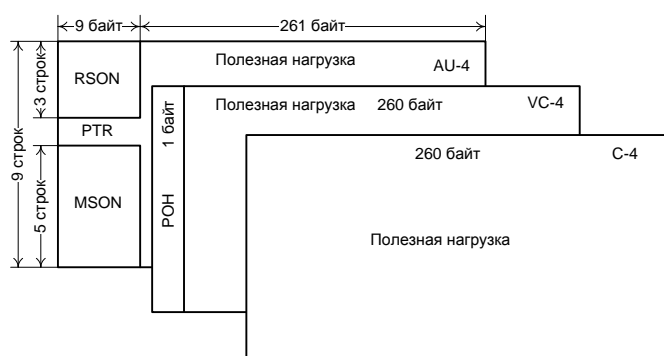


Рис. 3.8 – Структура модуля STM-1

Чтобы определить маршрут транспортного модуля, в левой части рамки записывается секционный заголовок (Section Over Head, SOH). Нижние  $5 \cdot 9 = 45$  байтов (после указателя) отвечают за доставку информации в то место сети, к тому

мультиплексу, где этот транспортный модуль будет переформировываться. Данная часть заголовка так и называется: секционный заголовок мультиплексора (MSOH). Верхние  $3 \cdot 9 = 27$  байтов (до указателя) представляют собой секционный заголовок регенератора (RSOH), где будут осуществляться восстановление потока, "поврежденного" помехами, и исправление ошибок в нем.

Один цикл передачи включает в себя считывание в линию такой прямоугольной таблицы. Порядок передачи байтов — слева направо, сверху вниз (так же, как при чтении текста на странице). Продолжительность цикла передачи STM-1 составляет 125 мкс, т.е. он повторяется с частотой 8 кГц. Каждая клеточка соответствует скорости передачи  $8 \text{ бит} \cdot 8 \text{ кГц} = 64 \text{ кбит/с}$ . Значит, если тратить на передачу в линию каждой прямоугольной рамки 125 мкс, то за секунду в линию будет передано  $9 \cdot 270 \cdot 64 \text{ Кбит/с} = 155\,520 \text{ Кбит/с}$ , т.е. 155 Мбит/с.

Для создания более мощных цифровых потоков в SDH-системах формируется следующая скоростная иерархия: четыре модуля STM-1 объединяются путем побайтового мультиплексирования в модуль STM-4, передаваемый со скоростью 622,080 Мбит/с; затем четыре модуля STM-4 объединяются в модуль STM-16 со скоростью передачи 2488,320 Мбит/с; наконец четыре модуля STM-16 могут быть объединены в высокоскоростной модуль STM-64 (9953,280 Мбит/с).

В сети SDH применены принципы контейнерных перевозок. Подлежащие транспортировке сигналы предварительно размещаются в стандартных контейнерах (Container — C). Все операции с контейнерами производятся независимо от их содержания, чем и достигается прозрачность сети SDH, т.е. способность транспортировать различные сигналы, в частности сигналы PDH.

Наиболее близким по скорости к первому уровню иерархии SDH (155,520 Мбит/с) является цифровой поток со скоростью 139,264 Мбит/с, образуемый на выходе аппаратуры плезиохронной цифровой иерархии ИКМ-1920. Его проще всего разместить в модуле STM-1. Для этого поступающий цифровой сигнал сначала "упаковывают" в контейнер (т.е. размещают на определенных позициях его цикла), который обозначается C-4. Рамка контейнера C-4 содержит 9 строк и 260 однобайтовых столбцов. Добавлением слева еще одного столбца — маршрутного или трактового заголовка (Path Over Head, POH) — этот контейнер преобразуется в виртуальный контейнер VC-4.

Наконец, чтобы поместить виртуальный контейнер VC-4 в модуль STM-1, его снабжают указателем (PTR), образуя таким способом административный блок AU-4 (Administrative Unit), а последний помещают непосредственно в модуль STM-1 вместе с секционным заголовком SOH (Рисунок 1.3).

Синхронный транспортный модуль STM-1 можно загрузить и плезиохронными потоками со скоростями 2,048 Мбит/с. Такие потоки формируются аппаратурой ИКМ-30, они широко распространены в современных сетях. Для первоначальной "упаковки" используется контейнер C12. Цифровой сигнал размещается на определенных позициях этого контейнера. Путем добавления маршрутного, или транспортного, заголовка (РОН) образуется виртуальный контейнер VC-12. Виртуальные контейнеры формируются и расформируются в точках окончаний трактов.

В модуле STM-1 можно разместить 63 виртуальных контейнера VC-12. При этом поступают следующим образом. Виртуальный контейнер VC-12 снабжают указателем (PTR) и образуют тем самым транспортный блок TU-12 (Tributary Unit) Теперь цифровые потоки разных транспортных блоков можно объединять в цифровой поток 155,520 Мбит/с. Сначала три транспортных блока TU-12 путем мультиплексирования объединяют в группу транспортных блоков TUG-2 (Tributary Unit Group), затем семь групп TUG-2 мультиплексируют в группы транспортных блоков TUG-3, а три группы TUG-3 объединяют вместе и помещают в виртуальный контейнер VC-4. Далее путь преобразования известен (Рисунок 3.9).

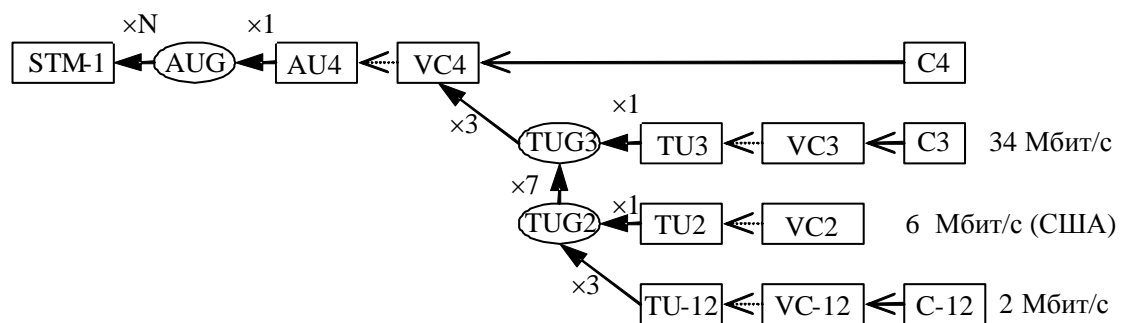


Рис. 3.9. Упрощенная схема преобразования в SDH

Плезиохронные цифровые потоки всех уровней размещаются в контейнерах C с использованием процедуры выравнивания скоростей (положительного, отрицательного и двухстороннего).

Важной особенностью аппаратуры SDH является то, что в трактовых и сетевых заголовках помимо маршрутной информации создается много информации, позволяющей обеспечить наблюдение и управление всей сетью в целом, дистанционные переключения в мультиплексорах по требованию клиентов, осуществлять контроль и диагностику, своевременно обнаружить и устранять неисправности, реализовать эффективную эксплуатацию сети и сохранить высокое качество предоставляемых услуг.

К особенностям SDH можно отнести:

- синхронную передачу и мультиплексирование. Элементы сети используют один задающий генератор, поэтому вопросы построения системы синхронизации становятся особо важными;

- предусматривает прямой ввод/вывод потока E1;
- надёжность и самовосстанавливаемость сети, обусловленные тем, что, во-первых, сеть использует волоконно – оптические кабели, передача по которым не подвержена действию электромагнитных помех, во-вторых, архитектура и гибкое управление сетями позволяет использовать защищенный режим работы, допускающий два альтернативных пути распространения сигнала с почти мгновенным переключением в случае повреждения одного из них, а также обход поврежденного узла сети, что делает эти сети самовосстанавливающимися;

- выделение полосы пропускания по требованию – услуга, которая раньше могла быть осуществлена только по заранее спланированной договоренности, теперь может быть предоставлена в считанные секунды путем переключения на другой канал;

- прозрачность для передачи любого трафика, что обусловлено использованием виртуальных контейнеров для передачи трафика, сформированного другими технологиями (ATM, ISDN, Frame Relay);

- гибкость управления сетью, обусловленная наличием большого числа широкополосных каналов управления.

Подведем итоги рассмотренных нами систем цифровой иерархии:

#### **Отличия SDH от PDH:**

1. Единый для всех высокостабильный тактовый генератор;
2. Большое количество служебной информации, т.е. заголовков и указателей;
3. Универсальный интерфейс (имеется в виду взаимодействие) для всех национальных систем: США, Япония, Европа.

#### **Достоинства SDH:**

1. Упрощенный процесс мультиплексирования и демупльтиплексирования. Здесь не надо много распаковывать, как в ПЦИ, так как есть много заголовков.
  2. Простота ввода компонентных сигналов - Заголовки + плавающий режим
  3. Качественное управление сложными сетями:
- управление конфигурацией;

- управление неисправностями: выявление дистанционной неисправности и исправление ее;
- управление качеством;
- управление безопасностью.

#### **Недостатки SDH:**

1. Система очень дорогая;
2. Должна быть высочайшая стабильность частоты. А это сделать сложно.
3. Большое время вхождения в синхронизм;
4. Система чрезвычайно избыточна, т.к. много заголовков и пустых мест на будущее. Но это окупается высокой пропускной способностью.

#### **Частотные диапазоны РРЛ**

##### **Диапазон 7 ГГц (7.25-7.55 ГГц)**

Диапазон 7 ГГц освоен в настоящее время достаточно хорошо. В нем работает большое количество радиорелейных систем средней емкости (порядка 300-700 ТЛФ каналов в стволе для аналоговых систем и до 55 Мбит/с - для цифровых). Существует и аппаратура большой емкости, предназначенная для передачи потоков STM-1. В этом диапазоне на распространение сигнала начинают оказывать влияние гидрометеоры (дождь, снег, туман и пр.). Кроме того, влияет атмосферная рефракция, приводящая к закрытию трассы или к интерференции волн.

Средняя протяженность пролета РРЛ составляет 30-40 км. Антенны имеют высокий коэффициент усиления при диаметрах порядка 1.5 - 2.5 м.

Число радиосредств в России, использующих этот диапазон, пока относительно невелико, и, следовательно, электромагнитная обстановка благополучна. Однако необходимо учитывать помехи от соседних радиорелейных линий, работающих в данном диапазоне частот.

##### **Диапазоны 11 и 13 ГГц (10.7-11.7, 12.7-13.2 ГГц)**

Эти диапазоны перспективны с точки зрения эффективности систем РРЛ. При протяженности пролета 15-30 км, высокоэффективные антенны имеют небольшие габариты и вес, что обеспечивает относительную дешевизну антенных опор.

Доля влияния атмосферной рефракции на устойчивость работы систем уменьшается, но увеличивается влияние гидрометеоров. В этих диапазонах, в основном, строятся цифровые радиорелейные системы связи на скорости до 55 Мбит/с, хотя, есть примеры передачи цифровых потоков со скоростями до 155 Мбит/с.

Но эти диапазоны используют большое количество радиосредств. Спутниковые системы связи, различные радиолокаторы и пеленгаторы, охранные системы создают неблагоприятную электромагнитную обстановку, что затрудняет работу в данных диапазонах.

#### **Диапазоны 15 и 18 ГГц (14.5-15.35, 17.7-19.7 ГГц)**

Интенсивное развитие систем связи привело к бурному освоению этих диапазонов частот. Средняя протяженность пролетов достигает 20 км для зон с умеренным климатом. Аппаратура выполняется в виде моноблока. Типовые параболические антенны имеют диаметры 0.6, 1.2 или 1.8 м при коэффициентах усиления от 38 до 46 дБ. В ряде регионов России диапазон 15 ГГц уже перегружен радиосредствами. Диапазон 18 ГГц пока более свободен.

На распространение сигналов сильное влияние оказывают гидрометеоры и интерференция прямых и отраженных волн. Ослабление в дожде может составлять 1-12 дБ/км (при интенсивности дождей 20-160 мм/час). Некоторое влияние оказывает и сама атмосфера (атомы кислорода и молекулы воды), ослабление в которой достигает 0.1 дБ/км.

#### **Диапазон 23 ГГц (21.2-23.6 ГГц)**

Согласно рекомендациям МСЭ-Р в этом диапазоне разрешено строить системы аналоговой и цифровой связи любой емкости. Средняя протяженность пролетов меньше 20 км, так как на распространение сигналов сильное влияние оказывают гидрометеоры и ослабления в атмосфере. Желательно использовать вертикальную поляризацию радиоволн, хотя разрешено использование любой поляризации. Типовые параболические антенны имеют диаметры 0.3, 0.6 и 1.2 м.

Ослабление в дождях может быть от 2 до 18 дБ/км, а в атмосфере достигает 0.2 дБ/км. Диапазон разрешено использовать в спутниковых системах связи. Поэтому при расчетах необходимо учитывать возможность помех.

Таким образом, в соответствии с вышесказанным в нашем случае более предпочтительным является диапазон 7 ГГц, поскольку у ООО «Томсктрансгаз» используемая аналоговая РРЛ уже работает на этих частотах, следовательно получать разрешение ГРЧК не требуется, а нужно просто подать заявление на регистрацию нового оборудования и частотного плана. Кроме того, оборудование фирм, рассчитанное на пропускную способность в STM-1 для данного диапазона, значительно дешевле своих аналогов, работающих на более высоких частотах.



## Виды станций РРЛ

На РРЛ имеется несколько видов станций:

1. **Оконечная станция (ОС)**, предназначаются для ввода в РРЛ многоканального и ТВ сигнала на стороне передачи и для выделения этих сигналов на стороне приема. ОС РРЛ связана соединительными линиями с МТС и ТЦ. Часто ОС совмещаются с ТЦ. Структурная схема ОС приведена на рисунке 3.10.

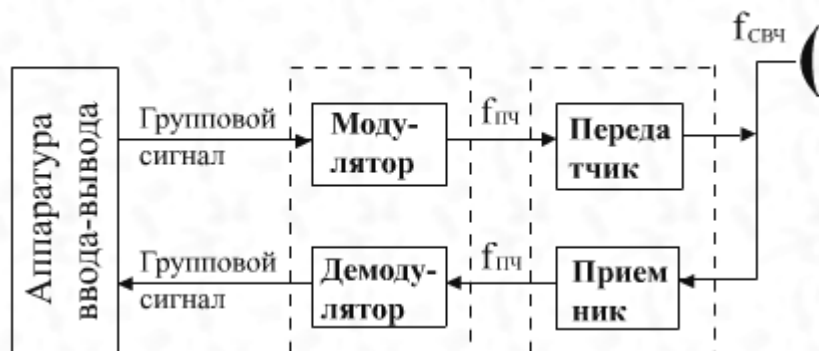


Рис. 3.10. Структурная схема ОС

2. **Промежуточная станция (ПС)**, предназначена для приема сигналов от предыдущей станции, их усиления и передачи в направлении следующей станции. Соединение на ПС между передатчиком и приемником осуществляется по промежуточной частоте, т.е. без демодуляции сигналов в приемнике и без модуляции в передатчике. При необходимости может быть осуществлено выделение ТВ программы - для этого демодуляция сигнала промежуточной частоты осуществляется путем его снятия с дополнительного выхода приемника, что не оказывает влияние на качественные показатели сквозных каналов.

В малоканальных РРЛ и особенно в РРЛ с временным разделением применяется построение аппаратуры ПС, при котором демодуляция и модуляция производится на каждой ПС. Это позволяет вводить и выводить ТЛФ каналы на любой ПС. Структурная схема станции приведена на рисунке 3.11.

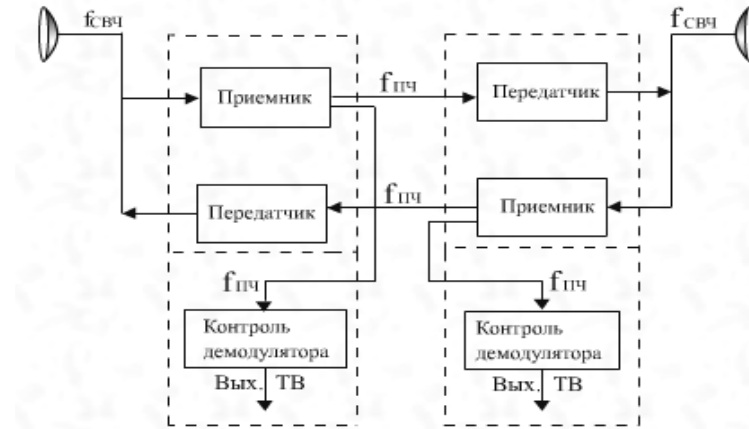


Рис. 3.12. Структурная схема ПС

3. **Узловые станции (УС)** предназначены для выделения части ТЛФ каналов и введения соответствующего количества новых каналов. От УС часто берут начало новые РРЛ (линии ответвления). В ТЛФ стволах на УС производится демодуляция сигналов со стороны приема и модуляция со стороны передачи. При необходимости эти преобразования производятся и в ТВ стволах. Структурная схема станции приведена на рисунке 3.13.

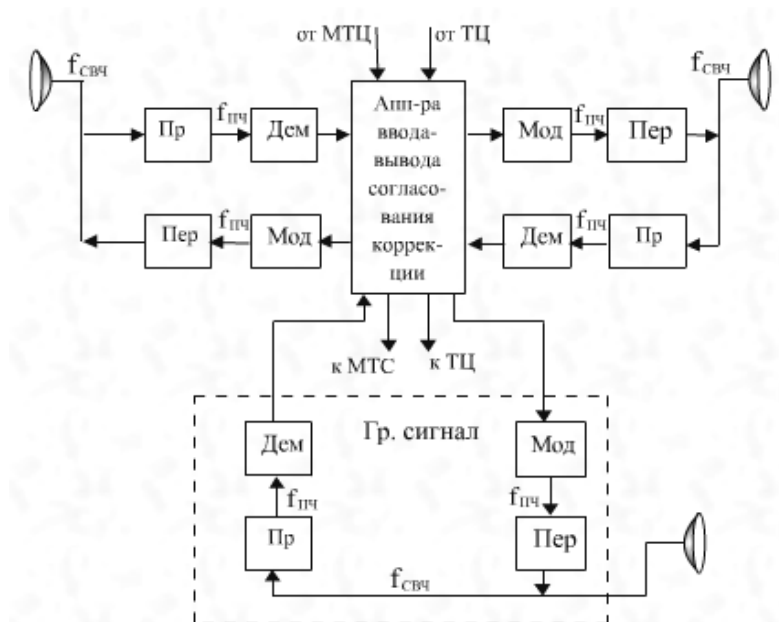


Рис. 3.13. Структурная схема УС

**Основные требования, предъявляемые к антеннам РРЛ**

В настоящее время на РРЛ прямой видимости применяются передатчики мощностью 2 ÷ 10 Вт и в последнее время даже 0,5 Вт. Расстояние между

промежуточными пунктами составляет  $40 \div 60$  км и высота мачт  $50 \div 100$  м. При этом для устойчивой связи необходимо, чтобы коэффициент усиления антенны составляет  $1000 \div 40000$  ( $30 \div 46$  дБ). Обычно антенны дециметровых волн обладают коэффициентом усиления примерно 30 дБ и антенны сантиметровых волн  $40 \div 46$  дБ.

На магистральных РРЛ большой емкости применяют, как правило, двухчастотную схему, которая, как известно, требует защитного действия антенн не менее  $65 \div 70$  дБ.

Для увеличения переходного затухания между трактами приема и передачи, излучаемое и принимаемое антенной поля должны иметь взаимно перпендикулярные поляризации. Для этого линии питания и облучатель антенны должны быть выполнены так, чтобы было можно одновременно передавать и принимать волны с различными поляризациями, и диаграмма направленности антенны должна быть асимметричной.

Отраженные волны в тракте питания приводят к нелинейности фазовой характеристики последнего, что вызывает нелинейные искажения в сигнале. Допустимая величина коэффициента отражения, вызванного рассогласованием линии с антенной, для многоканальных систем не должна превышать 2 % во всей рабочей полосе частот. Для этих систем полоса частот, удовлетворяющая данному требованию, должна составлять  $10 \div 15$  % от несущей частоты высокочастотного сигнала.

Конструкция антенны должна быть жесткой, чтобы при порывах ветра упругая деформация антенны не превышала допустимую величину. Атмосферные осадки не должны попадать в тракт питания антенны, т.к. это приводит к увеличению затухания в тракте и к рассогласованию. Антенна должна иметь возможность поворота в небольших пределах с целью точной установки направления максимального излучения на корреспондента.

### **План распределения частот**

Под частотным планом системы РРЛ связи понимают распределение частот приема и передачи между стволами системы, а также распределение частот гетеродинов, т.е. распределение частот передачи и приема на одном стволе.

Так как особенностью построения аппаратуры РРЛ связи является то, что на ПС приемные и передающие антенны одного направления связи практически расположены рядом, то возникающие в этом случае взаимосвязи между антеннами не позволяют использовать одни и те же рабочие частоты при приеме и передачи сигналов в данном направлении. Поэтому на ПС возникает необходимость в изменении рабочих частот приема и передачи как при организации односторонней, так и двусторонней связи. Изменение частот производится на каждой станции в соответствии с принятой схемой построения аппаратуры.

Следовательно, ПС выполняет две функции:

1. Усиление сигнала;
2. Преобразование частоты СВЧ сигнала с целью устранения возможной связи между передатчиком и приемником данной станции.

Существуют три плана распределения частот в РРЛ прямой видимости, для ствола:

- двухчастотный план (рисунок 3.14 );
- четырехчастотный план (рисунок 3.15 );
- шестичастотный план (рисунок 3.16).

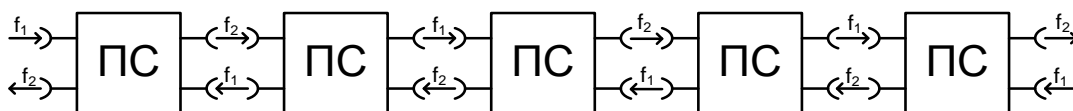


Рис. 3.14. Схема двухчастотного плана

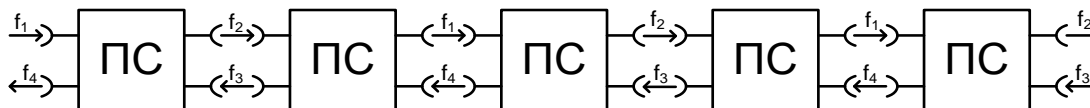


Рис. 3.15. Схема четырехчастотного плана

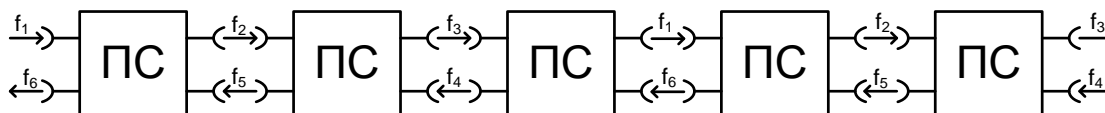


Рис. 3.16. Схема шестичастотного плана

**Двухчастотная система** экономична с точки зрения использования диапазона частот, но требует высоких защитных свойств антенн от приема сигналов с обратного направления. При двухчастотной системе используются РПА, параболические или другие антенны, имеющие защиту от приема сигналов с обратного направления порядка  $60 \div 70$  дБ. Такая система применяется обычно на РРЛ большой и средней емкости.

**Четырехчастотная система** допускает использование более простых дешевых конструкций антенных систем, например перископических. Однако количество дуплексных радиостволов, которое может быть образовано в данной полосе частот при четырехчастотной системе в два раза меньше, чем при двухчастотной системе. Четырехчастотная система с более простыми антенными системами применяется на РРЛ средней и малой пропускной способности, предназначенных для внутризональных и низовых связей.

Частоты приема и передачи в одном стволе РРЛ чередуются от станции к станции. Станции, на которых прием осуществляется на более низкой частоте ( $f_1$ ), а передача на более высокой ( $f_2$ ), обозначаются индексом “НВ”, а станции, на которых прием производится на более высокой частоте ( $f_2$ ), передача на более низкой ( $f_1$ ) обозначается индексом “ВН”.

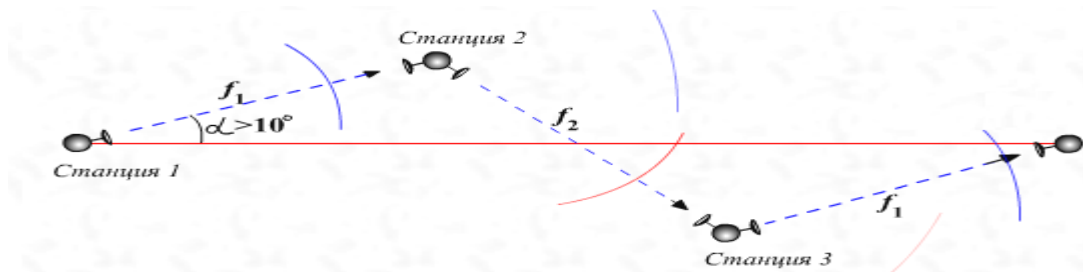


Рис. 3.17. Расположение станций РРЛ

Повторение через интервал одних и тех же частот допустимо потому, что в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн при отсутствии прямой видимости между антеннами ослабление сигнала достаточно велико. Однако при некоторых условиях распространения радиоволн, например при повышенной рефракции, возможен прием сигнала от станции, отстоящей на 3 интервала (минус 2 станции), что и приводит к значительным искажениям передаваемых сигналов. Во избежание этого станции РРЛ располагают на ломаной линии с тем, чтобы паразитный сигнал дополнительно сильно ослаблялся за счет направленных свойств антенн (рисунок 3.17).

Для того чтобы свести к минимуму интерференционные помехи в многоствольных РРЛ, возникающие при одновременной работе нескольких приемников и передатчиков на общий антенно-фидерный тракт, существуют определенные планы распределения частот.

Во всех современных РРЛ системах применяются планы с разнесенными частотами приема и передачи, т.е. частоты приема размещены в одной половине диапазона, а частоты передач – в другой половине диапазона. Такой план распределения частот приведен на рисунке 3.18.

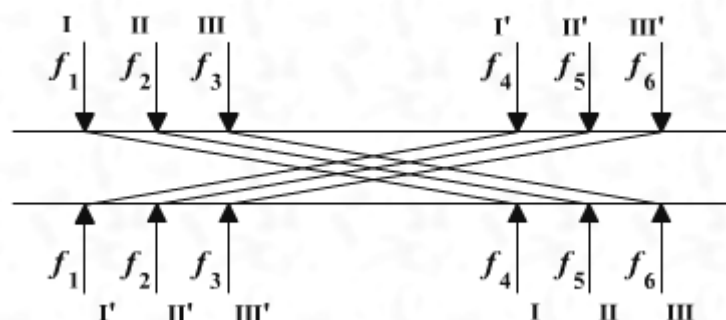


Рис. 3.18 - План с разнесенными частотами приема и передачи

При таком плане распределения частот разность между частотами передачи и приема одного ствола значительно и это облегчает требования к характеристикам приемных полосовых фильтров. При этом плане каждая антенна может быть использована одновременно как для передачи, так и приема сигналов.

Существует второй план распределения частот – при этом плане предусматривается чередование частот приема и передачи отдельных стволов (рисунок 3.19).

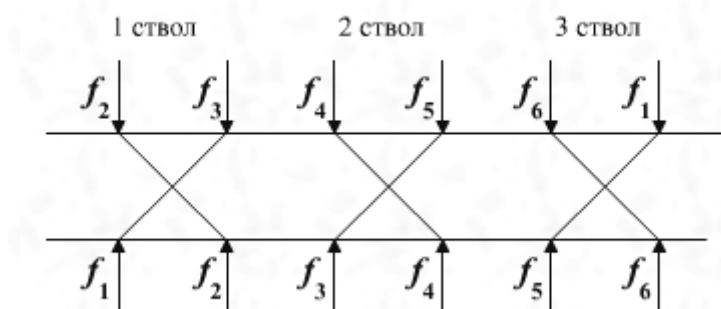


Рис. 3.19 – План с чередованием частот приема и передачи

В нашем случае выберем четырехчастотный план, поскольку двухчастотного будет недостаточно из-за почти прямолинейного расположения РРС. С другой стороны, использование шестичастотного плана неоправданно с точки зрения частотного ресурса, получение разрешения на использование которого в диапазоне 7 ГГц может быть проблематично из-за его занятости. Выбор частот приема и передачи осуществим по предоставленной производителем оборудования формуле:

$$F_H = 7400 - 164.5 + 28 \cdot n \quad (3.1)$$

$$F_B = 7400 - 3.5 + 28 \cdot n \quad (3.2)$$

Формула 3.1 позволяет рассчитать нижнюю рабочую частоту приемо-передатчика, а формула 3.2 – верхнюю, при условии, что шаг сетки частот составляет 28 МГц, а дуплексный разнос – 160 МГц. Полный частотный план проектируемой РРЛ приведен на структурной схеме РТФ ДП.464543.001 ЭЗ.

### Оборудование РРЛ

Размещение оборудования радиорелейных систем производится по следующим принципам:

1. Антенны размещаются на мачте и с оборудованием их соединяют волноводы. Герметичность антенно-волноводного тракта (АВТ) обеспечивается установкой дегидраторов – устройств, обеспечивающих избыточное давление в

волноводах. Оборудование находится на земле в помещении, где поддерживается необходимый микроклимат.

2. Размещение приемопередающего высокочастотного (ВЧ) оборудования возле антенны и остальное оборудование внизу в помещении. Соединение между модулятором и ВЧ трактом выполняется коаксиальным кабелем, по которому также подается питание на передатчики и приемники. При использовании разнесенного приема дополнительное оборудование также размещается на мачте возле приемной антенны.

Система электропитания ЦРРС обеспечивается соединением нескольких источников энергии – внешних источников электроснабжения, солнечных батарей, ветроэлектрогенераторов и аккумуляторных батарей, обеспечивающих работу оборудования при перерывах подачи электроэнергии от других источников. Все оборудование разделяется на классы энергопотребителей, в зависимости от этого обеспечивается та или иная система резервирования источников электропитания.

Существует и тенденция в размещении оборудования: если в недавнем прошлом все оборудование ЦРРС размещалось на земле, то в настоящее время с ростом миниатюризации элементов производители при производстве радиорелейных станций все больше проектируют радиооборудование с размещением возле антенны, как более дешевое. Номенклатура цифровых радиорелейных станций с размещением всего оборудования на земле становится все меньше, а то и вообще отсутствует. Как правило, современные производители стараются обеспечить возможность размещения оборудования как на земле, так и возле антенны, а заказчик уже сам выбирает, как ему удобно.

Исполнение с размещением оборудования возле антенны имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам следует отнести следующее:

- Отсутствует затухание в волноводном тракте, которое на высоких частотах достигает довольно больших величин. Например, на частоте 7 ГГц затухание в стандартном волноводе марки Е65 – 0,06дБ/м, что на 100метров длины волновода дает затухание на прием и на передачу на 6дБ. На более высоких частотах затухание будет еще больше. Компенсация потерь на затухание требует увеличения мощности передатчика и применения антенн большего диаметра для увеличения уровня принимаемого сигнала, что значительно удорожает систему.
- Стоимость соединительного коаксиального кабеля значительно ниже стоимости волновода.
- Отпадает проблема поддержания герметичности волноводного тракта.

### **Существуют и недостатки:**

- При размещении СВЧ оборудования на мачте часто затруднен доступ к нему для настройки, обслуживания, профилактики или при неисправностях, что значительно замедляет устранение повреждений – важное условие при эксплуатации магистральных линий связи.
- Оборудование должно работать в большом диапазоне температур наружного воздуха – от максимальной – летом до минимальной – в сильный мороз. При этом надо учитывать, что радиочастотный блок размещен в открытом пространстве, где солнце может дополнительно разогреть его.
- Необходимо применять дополнительные меры грозозащиты, предотвращающие выход из строя ВЧ оборудования в радиочастотном блоке.
- Затруднено, а то и невозможно наращивание количества стволов при использовании одной антенны.

При проектировании данной радиорелейной линии связи основными недостатками размещения оборудования возле антенны стали следующие факторы:

1. не все фирмы дают гарантии работы оборудования при крайне отрицательных температурах, таких как -50 и ниже, при этом зима 2006 года показала важность данного показателя;
2. подобное размещение затрудняет проведение профилактических работ, которые проводятся достаточно часто, так как деятельность ООО «Томсктрансгаз» связано с особо опасным производством.

Использование аппаратуры в благоприятных условиях аппаратной, позволяет увеличить срок ее эксплуатации, что немаловажно при необходимости обеспечения непрерывности технологической связи.

### **Фирмы производители РРЛ**

Главными факторами, которые следует учитывать при выборе поставщика радиорелейного оборудования, являются:

- положительные отзывы ведущих операторов связи;
- опыт эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях;
- наличие сервисных центров;
- перспективы производства оборудования на ближайшее десятилетие;
- экономическая целесообразность внедрения;
- стоимостные характеристики.

Анализ возможностей использования оборудования отечественных производителей показывает, что, несмотря на растущее число производителей отечественного



оборудования ЦРПС уровня STM-1 (M-Link, «Пламя», Nateks Microlink SDH), оно не соответствует первым двум критериям.

Кроме того, в большинстве случаев данное оборудование собрано из отдельных узлов производства зарубежных производителей, в том числе малоизвестных на телекоммуникационном рынке, а используемое отечественное программное обеспечение часто конфликтует со старыми версиями. Опыта их использования на магистральных линиях практически нет. Сертификаты получены на использование во внутризональных радиорелейных линиях.

Из зарубежного оборудования внимания заслуживает прежде всего продукция, имеющая положительные отзывы российских операторов и удовлетворяющая перечисленным ниже требованиям.

Среди них выделяются три производителя - NEC (ЦРПС DMR 3000S), Nera (Interlink) и Harris (MegaStar) на их оборудовании остановили свой выбор наиболее крупные телекоммуникационные операторы, и это оборудование имеет длительный и положительный срок эксплуатации.

Произведя поиск в Internet, было обнаружено, что фирма Harris не имеет в России своего представительства и, соответственно, сервисного центра. В дополнении можно отметить, что в России очень малое количество дилеров работает с их продукцией. Таким образом, наш выбор останавливается на фирмах Nec и Nera, имеющих свои представительства как в России, так и в странах СНГ. В этом можно убедиться, посетив их сайты по следующим адресам: [www.nera.com.ru](http://www.nera.com.ru) и [www.nec.ru](http://www.nec.ru). Кроме того, оборудование этих фирм более дешевое.

Для DMR 3000S и MegaStar характерно нижнее расположение радиомодулей с эффективной и надежной системой дегидрации волноводных трактов. По оценкам операторов связи, оборудование хорошо себя зарекомендовало в эксплуатации. В обеих станциях применены специальные схемы коррекции дисперсионных искажений, а также эквалайзеры для компенсации потерь и борьбы с замираниями сигналов. ЦРПС DMR 3000S обеспечивает увеличение пропускной способности до 16 потоков по 155,52 Мбит/с, MegaStar - до 7 потоков уровня STM-1.

Поскольку мы проектируем внутризональную радиорелейную линию (ее протяженность – 275.5 км), то нам не нужно оборудование, способное передавать до нескольких потоков STM-1.

Для применения на внутризональных ЦРПЛ и линиях относительно небольшой протяженности представляют интерес ЦРПС Pasolink+ (NEC), TRuepoint (Harris), InterLink и CityLink (NERA). Пропускная способность каналобразующей аппаратуры составляет 155 Мбит/с синхронной цифровой иерархии уровня STM-1 с возможностью

увеличения до 4 потоков 155,52 Мбит/с. Наличие встроенного мультиплексора и единой системы управления позволяет минимизировать затраты на создание транспортной инфраструктуры. Кроме того, оборудование допускает как нижнее, так и верхнее расположение радиомодулей. Для компенсации дисперсионных искажений, возникающих вследствие замираний в волноводной части, используются высокоэффективные корректоры. Возможно пространственное разнесение антенн и радиомодулей на расстояние до 200 м.

В ходе поиска характеристик радиорелейного оборудования вышеуказанных фирм-производителей, столкнулся с основной проблемой. Ни один из официальных дилеров или представительств фирм не дает полную и подробную информацию о своем оборудовании и его применении в конкретных случаях.. В связи с этим фактом, дальнейшее проектирование было решено производить на оборудовании фирмы «Микран», хотя, по имеющимся сведениям, ни один из комплектов еще не был установлен, поэтому опыта эксплуатации данного радиорелейного оборудование нет.

Кроме того, оборудование фирмы «Микран» не позволяет нижнее размещения высокочастотного оборудования, что также является большим минусом при его эксплуатации.

#### **Радиорелейное оборудование фирмы «Микран»**

Аппаратура цифровых радиорелейных станций SDH иерархии «МИК-РЛххС» работает в диапазоне частот от 4 до 40 ГГц со скоростью передачи информации 155.52 Мбит/с и позволяет в пределах пропускной способности передавать 1 поток STM-1 или 63 потока E1 или 42 потока E1 + трафик Ethernet (50 Мбит/с) или 21 поток E1 + трафик Ethernet (100 Мбит/с)].

**Высокоскоростные ЦРРС «МИК-РЛ4...6С»** предназначены для организации магистральных линий связи в диапазонах частот 4; 5 и 6 ГГц;

**Высокоскоростные ЦРРС «МИК-РЛ7...15С»** предназначены для организации внутризональных, местных и технологических линий связи в диапазонах частот 7...15 ГГц;

**Высокоскоростные ЦРРС «МИК-РЛ18...40С»** предназначены для организации местных и технологических линий связи в диапазонах частот 18...40 ГГц;



Рис. 3.20. Общий вид радиорелейной аппаратуры SDN иерархии «Микран»

### ***Исполнение системы***

Станции МИК-РЛ4...40С представляют собой функционально законченные системы передачи, позволяющие строить синхронные сети связи произвольной топологии.

В состав РРС входят: приёмопередающая аппаратура, мультиплексоры уровня STM-1 (терминальные и ввода-вывода), источники гарантированного электропитания и система управления сетью.

В традиционном для систем МИК-РЛ раздельном исполнении возможна реализация конфигураций 1+0; 1+1 и 2+0. Станция в конфигурации 1+1 состоит из двух выносных приемопередатчиков и приемников канала пространственного разнесения, устанавливаемых непосредственно на антеннах, и оборудования внутреннего исполнения – модуля доступа МД1-6. При нижнем расположении приёмопередатчиков возможна реализация конфигураций 2+1, 3+0 или 3+1, в этом случае используется два модуля доступа МД1-6.

### ***Особенности аппаратной реализации.***

Архитектура модуля доступа МД1-6 позволяет в составе одного модуля простым добавлением необходимого количества блоков реализовать следующие варианты станций:

- терминальная станция 63xE1, одно направление по СВЧ, конфигурация 1+0 или 1+1;
- станция ввода/вывода 21xE1 или 42xE1, два направления по СВЧ, конфигурация 1+0 или 1+1;

- регенераторная станция без выделения потоков E1, два направления по СВЧ, конфигурация 1+0 или 1+1;
- регенераторная станция без выделения потоков E1, конфигурация 1+0 или 1+1, одно направление по СВЧ и одно направление по STM-1 (для работы с SDH-мультиплексорами других производителей).



Рис. 3.21 – Модуль доступа МД1-6

Модуль доступа МД1-6 имеет в своём составе мультиплексор STM-1 который обеспечивает мультиплексирование трибутарных цифровых потоков и сервисных каналов, вместо передачи потоков E1 возможна организация передачи трафика Ethernet ( $n \times 21E1$ ). Модемы формируют спектр радиосигнала на промежуточной частоте и имеют встроенную аппаратную поддержку пространственного разнесения, для реализации которого требуется только установка антенн и приёмников пространственного разнесения. В модуле доступа МД1-6 используется распределенная система электропитания, благодаря чему достигается общая надежность и независимость питания каждого блока от остальных. Модуль доступа МД1-6 выполнен в корпусе Евромеханика 19" высотой 6U.

В системе предусмотрены дополнительный канал передачи данных с программно выбираемым типом интерфейса RS-232/422/485 (скорость передачи от 110 до 57 600 бит/с) и 2 цифровых канала служебной связи РСМ-64 с двухпроводными окончаниями FXO/FXS с возможностью выхода в ТфОП. Для более эффективного использования каналов служебной связи на каждой станции предусмотрен встроенный коммутатор каналов. На всех промежуточных станциях возможен ввод/вывод сервисных каналов.

#### ***Контроль и управление сетью РРС***

Система управления состоит из сетевых агентов, размещаемых на каждой станции и программного обеспечения верхнего уровня. На уровне сетевых агентов, размещаемых на каждой станции, решаются задачи как локального управления при помощи подключаемого терминала на базе Pocket-PC, так и сетевого управления при

помощи менеджера сети - компьютера с установленным ПО «Магистраль». Система управления взаимодействует с сетью радиорелейных линий (РРЛ) посредством соединения TCP/IP (интерфейс - Ethernet 10Base-T) на основе протокола SNMP. Особенностью аппаратного исполнения агента сети является наличие подсистемы хранения «firmware» всех блоков, входящих в состав станции, предусмотрена процедура обновления «firmware». Ядром сетевого агента является операционная система реального времени (RTOS).

В аппаратуре реализована возможность удаленного конфигурирования рабочих параметров всех устройств, входящих в состав РРС. Из центра управления осуществляется необходимая оперативная поддержка по обслуживанию сети при ее эксплуатации, вносятся своевременные коррективы в работу устройств. Обновляемая библиотека файлов-описаний позволяет изменять методы представления/анализа данных и способы управления устройствами, что обеспечивает независимость ПО от оборудования.

Возможно создание нескольких центров управления сетью, благодаря чему нагрузка на канал управления распределяется более равномерно. При необходимости реализуется резервирование управления. ПО системы управления защищено от несанкционированного доступа. Используемый механизм предоставления привилегий позволяет вводить несколько уровней взаимодействия с системой, ограничивая или расширяя права операторов.

#### Список условных сокращений

БС – базовая станция;

ГЭС – гипотетическое эталонное соединение;

ГЭЦЛ - гипотетическая эталонная цифровая линия;

ГЭЦТ - гипотетический эталонный цифровой тракт;

ИБЭП – источник бесперебойного электропитания;

ЗОЗ – зона ограничения застройки;

МСЭ – международный союз электросвязи;

ОЦК – основной цифровой канал;

ПЦИ – плезиохронная цифровая иерархия;

ПЦК – первичный цифровой канал;

СЦИ – синхронная цифровая иерархия;

ТфОП – телефонная сеть общего пользования;

УАТС – учрежденческая автоматическая телефонная станция;

ЦРРЛ – цифровая радиорелейная линия;

SESR – коэффициент секунд со значительным количеством ошибок;

SINAD – отношение сигнал/шум.

### 3.3. Транкинговые системы радиосвязи

Под широко распространенным в настоящее время понятием "профессиональная мобильная радиосвязь" (ПМР) обычно понимают системы двусторонней сухопутной подвижной радиосвязи, использующие диапазон ультракоротких волн (УКВ).

Как правило, сети ПМР используются ограниченными группами пользователей, объединенными по профессиональному признаку. Это могут быть сети оперативного, диспетчерского, административно-хозяйственного, производственно-технологического и т. п. назначения. Они используются силовыми структурами и правоохранительными органами, аварийными и муниципальными службами, энергетическими, транспортными и производственными предприятиями и т. д. Именно поэтому сети ПМР часто называют ведомственными и корпоративными сетями радиосвязи.

Достаточно четко можно охарактеризовать сети профессиональной мобильной радиосвязи и по техническим признакам. По способам использования частотного ресурса системы двусторонней подвижной радиосвязи делятся на следующие классы:

- системы связи с закреплением за абонентами каналов связи (конвенциональные системы);
- системы связи с общим доступом абонентов к общему частотному ресурсу (транкинговые системы);
- системы связи с пространственно-разнесенным повторным использованием частот (сотовые системы).

Первые 2 класса и относятся к системам профессиональной мобильной радиосвязи.

Конвенциональные системы, являясь простейшим классом систем ПМР, используют принцип фиксированного закрепления каналов связи за определенной группой абонентов. По сравнению с другими классами систем подвижной радиосвязи для конвенциональных систем характерна, с одной стороны, наименьшая пропускная способность, определяемая достижимым количеством абонентов, работающих на одном канале, а с другой - наибольшая оперативность связи, характеризующаяся временем установления канала связи. Основным типом вызова в конвенциональных системах является групповой, при котором переговоры обеспечиваются по принципу "каждый со всеми". Вместе с тем, используемые в современных сетях конвенциональной радиосвязи системы избирательного вызова, основанные на различных методах сигнализации, позволяют разделять группы абонентов и осуществлять не только групповые, но и индивидуальные вызовы.

Транкинговые системы используют автоматическое распределение каналов связи между абонентами. Это означает, что все пользователи делят между собой общую группу радиоканалов, а выделение свободных каналов осуществляется по требованию абонентов. Основным элементом сетей транкинговой радиосвязи является базовая станция (БС), включающая несколько ретрансляторов с соответствующим антенным оборудованием и контроллер, который управляет работой БС, коммутрует каналы ретрансляторов, обеспечивает выход на телефонную сеть общего пользования или другую сеть фиксированной связи. По сравнению с конвенциональными сетями, сети транкинга обладают повышенной пропускной способностью, расширенными функциональными возможностями, разнообразными типами вызова (групповой, индивидуальный, широковещательный), большей зоной территориального охвата.

Целесообразность применения транкинговых систем при построении ведомственных и корпоративных сетей ПМР обуславливается двумя факторами: высокой плотностью абонентов и необходимостью централизованного управления системой.

Применение транкинговых систем при построении ведомственных и корпоративных сетей ПМР обуславливается как техническими, так и экономическими факторами.

Основная идея транкинга состоит в обеспечении равного доступа абонентов к общему частотному ресурсу. Такой доступ существенно повышает эффективность использования спектра по сравнению с системами с закреплением за абонентами каналов связи (конвенциональными системами). Можно говорить, что либо при одном и том же количестве каналов связи транкинговая система позволяет обслужить значительно большее количество абонентов, чем конвенциональная система (при одинаковом качестве обслуживания), либо при одном и том же количестве абонентов для реализации транкинговой системы потребуется меньше каналов связи. Например, одна четырех канальная система транкинговой связи в 7,5 раз эффективнее конвенциональной системы с тем же количеством каналов. Эффективность использования частотного ресурса определяет экономическую эффективность применения транкинговых систем. Считается, что транкинговая система становится экономически эффективной при количестве абонентов более 50-100.

Архитектура транкинговых систем основана на сети соединенных друг с другом базовых станций, каждая из которых обслуживает определенную зону. Такая архитектура позволяет строить сети радиосвязи самого различного масштаба: от локальных однозоновых сетей до крупных региональных сетей с широким территориальным охватом. При этом сохраняется возможность централизованного

управления сетью, что практически невозможно в конвенциональных сетях. Поэтому по сравнению с конвенциональными системами системы транкинговой радиосвязи обеспечивают гораздо более эффективное управление эксплуатацией и развитием сетей связи.

Совершенствование транкинговых систем позволяет говорить об их расширенных функциональных возможностях по сравнению с системами конвенциональной радиосвязи. Это касается разнообразных типов вызова (групповой, индивидуальный, широкоэвещательный), возможности использования приоритетных и аварийных вызовов, передачи данных, взаимодействия с телефонными сетями общего пользования (ТфОП), возможности динамического создания, модификации и удаления групп абонентов и т.д. В целом можно говорить, что транкинговые системы представляют наиболее мощный и эффективный класс систем ПМР.

По сравнению с сотовыми системами подвижной связи (ССПС) транкинговые системы обеспечивают ряд возможностей, не реализуемых ССПС. К ним, прежде всего, относится возможность групповой связи, которая является основным видом взаимодействия в сетях ПМР. Кроме этого, в транкинговых сетях возможны приоритетные и аварийные вызовы, динамическая перегруппировка абонентов, что недоступно абонентам сотовых сетей. Важнейшим преимуществом является высокая скорость установления соединения. В транкинговых системах время установления канала связи, как правило, не более 0.5 с, тогда как сотовые системы не позволяют установить соединение быстрее, чем за 5 с.

Транкинговые системы радиосвязи (ТСР) являются развитием систем низовой полудуплексной радиосвязи и по ряду признаков могут быть соотнесены с сотовыми системами связи. В отличие от обычных систем с постоянно закрепленными частотными каналами в ТСР применяется динамическое распределение каналов. Термин «транкинг», принятый в сфере профессиональной радиосвязи, означает метод свободного доступа большого числа абонентов к ограниченному числу каналов (пучку, стволу или, по зарубежной терминологии, - транку). Поскольку в какой-либо момент времени не все абоненты активны, необходимое число каналов значительно меньше общего числа абонентов.

Когда радиоабонент транкинговой системы осуществляет вызов, система назначает ему один из имеющихся свободных каналов. При этом статистика активности обычно такова, что небольшого количества выделенных каналов достаточно для обслуживания значительного числа абонентов. Эту ситуацию иллюстрируют цифры, заимствованные из документации на систему ACCESSNET фирмы Rohde & Schwarz (табл. 2.1).



В отличие от обычных систем радиосвязи ТСП характеризуются следующими признаками:

- экономное использование радиоспектра;
- наличие одной или нескольких базовой радиостанций и системы управления;
- возможность выхода в другие сети, в частности в телефонную сеть общего пользования;
- увеличение зоны обслуживания путем создания многозоновой сети;
- передача данных и телеметрической информации;
- множество сервисных возможностей.

Перечисленные выше признаки характерны и для сотовых систем связи. Однако, в отличие от сотовых, транкинговые системы в первую очередь ориентированы на задачи, связанные с оперативным управлением. Список потребителей здесь чрезвычайно широк - подразделения железных и автомобильных дорог, предприятия энергетического комплекса, администрации всех уровней, учреждения городского хозяйства, правоохранительные органы, отряды министерства по чрезвычайным ситуациям (МЧС), коммерческие структуры и т.д.

В сравнении с сотовыми системами к преимуществам ТСП, позволяющим отдать им предпочтение при организации оперативной связи, следует отнести:

- гибкую систему вызовов - индивидуальный, групповой, вещательный, приоритетный, аварийный и др.;
- гибкую систему нумерации - от коротких двух- или трехзначных до полноценных городских номеров;
- малое время установления соединения - менее секунды, против нескольких секунд в сотовых системах;
- возможность работы в группе;
- наличие (в ряде систем) режима непосредственной связи между двумя абонентскими радиостанциями без участия базовой;
- экономичность - по стоимости оборудования и по эксплуатационным расходам ТСП в несколько раз экономичнее сотовых систем.

Сравнивая сотовые и транкинговые системы, необходимо отметить, что при внешней структурной схожести они существенно отличаются по ряду функциональных особенностей и системных возможностей. Если первые ориентированы на потребителей обычных телефонных услуг и окупаются в регионах с высокой плотностью населения (порядка тысячи и более абонентов в зоне), то вторые, прежде

всего, являются средством оперативной и производственно-технологической связи и рентабельны при на порядок меньшем числе абонентов.

Следует заметить, что сами термины «сотовые» или «транкинговые системы» малоинформативны с точки зрения выявления их отличий. Так, в сотовых системах используется метод динамического распределения каналов, т.е. транкинг, и наоборот, современные многозоновые транкинговые системы содержат ряд «родовых» признаков сотовых систем. Эти термины сложились исторически и обозначают системы мобильной радиосвязи, которые развивались своими путями, решая разные задачи.

**Транкинговыми системами** называются радиально-зоновые системы наземной подвижной радиосвязи, использующие автоматическое распределение каналов связи ретрансляторов между абонентами. Это достаточно общее определение, но оно выражает в себе совокупность признаков, объединяющих все транкинговые системы - от простейших SmartTrunk до сверхсовременных TETRA. Термин "транкинг" происходит от английского trunking, что можно перевести как "объединение в пучок". В отечественной литературе можно встретить также термин "транковые системы" - видимо, по аналогии с англоязычным термином trunked systems.

#### **Однозоновые системы.**

Основные архитектурные принципы транкинговых систем легко просматриваются на обобщенной структурной схеме однозоновой транкинговой системы, представленной на рисунке 2.1. Инфраструктура транкинговой системы представлена базовой станцией (БС), в состав которой, помимо радиочастотного оборудования (ретрансляторы, устройство объединения радиосигналов, антенны) входят также коммутатор, устройство управления и интерфейсы различных внешних сетей.

**Ретранслятор.** Под ретранслятором в данном случае понимается набор приемопередающего оборудования, обслуживающего одну пару несущих частот. До последнего времени в подавляющем большинстве транкинговых систем одна пара несущих означала один канал трафика. Сегодня, с появлением систем стандарта TETRA и системы EDACS ProtoCALL, предусматривающих временное уплотнение, один ретранслятор может обеспечить два или четыре канала трафика.

**Антенны.** Важнейший принцип построения транкинговых систем заключается в том, чтобы создавать зоны радиопокрытия настолько большими, насколько это возможно. Поэтому антенны базовой станции, как правило, размещаются на высоких мачтах или сооружениях и имеют круговую диаграмму направленности. Разумеется, при расположении базовой станции на краю зоны применяются направленные антенны. Базовая станция может располагать как единой приемопередающей антенной, так и отдельными антеннами для приема и передачи. В некоторых случаях на одной мачте

может размещаться несколько приемных антенн для борьбы с замираниями, вызванными многолучевым распространением.

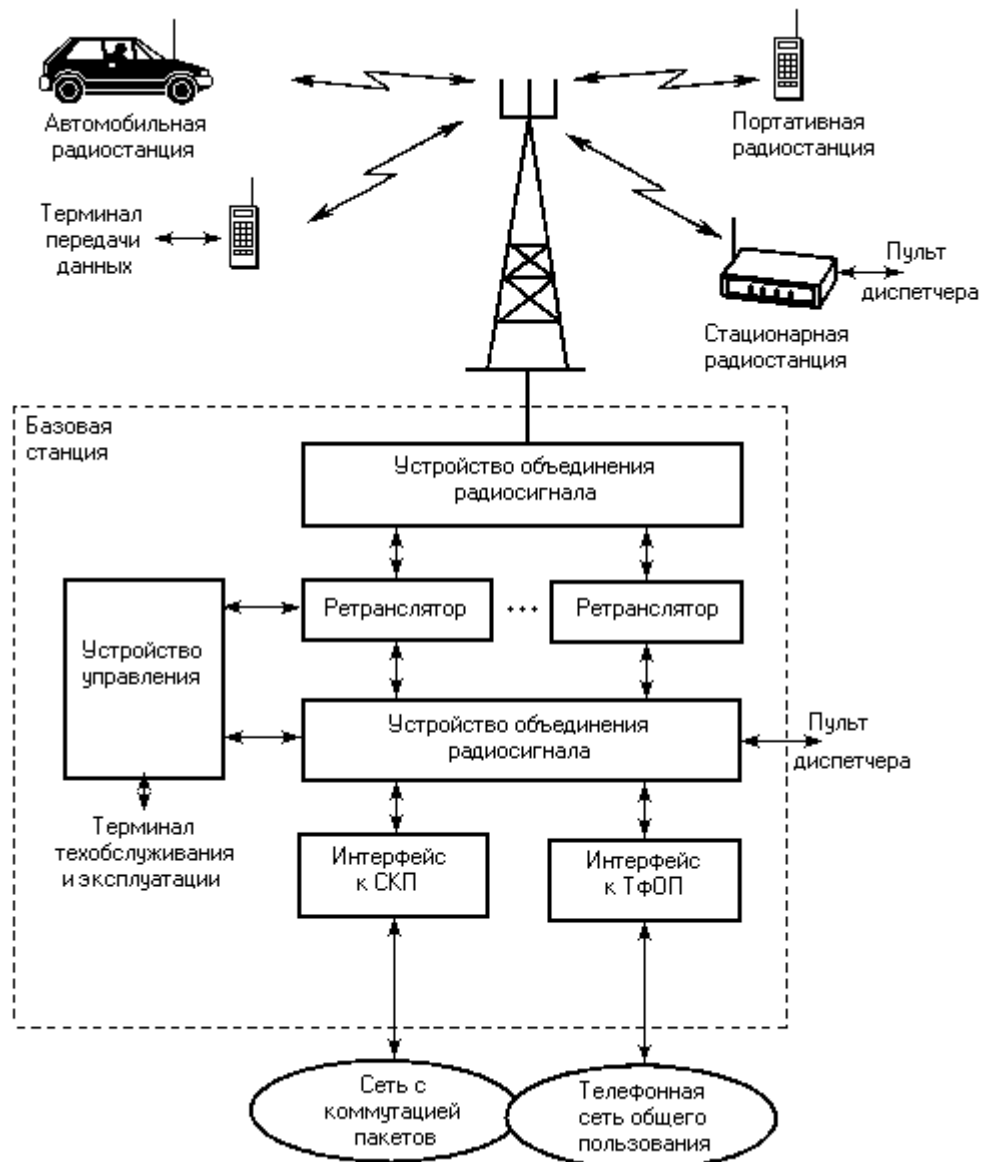


Рис. 3.21. Обобщенная структура однозонавой транкинговой системы

**Устройство объединения радиосигналов** позволяет использовать одно и то же антенное оборудование для одновременной работы приемников и передатчиков на нескольких частотных каналах. Ретрансляторы транкинговых систем работают только в дуплексном режиме.

**Коммутатор** в однозонавой транкинговой системе обслуживает весь ее трафик, включая соединение подвижных абонентов с ТФОП и все вызовы, связанные с передачей данных.

**Устройство управления** обеспечивает взаимодействие всех узлов базовой станции. Оно также обрабатывает вызовы, осуществляет аутентификацию вызывающих абонентов, ведение очередей вызовов, внесение записей в базы данных повременной оплаты. В некоторых системах управляющее устройство регулирует максимально

допустимую продолжительность соединения с телефонной сетью. Как правило, используются два варианта регулировки: уменьшение продолжительности соединения в заранее заданные часы наибольшей нагрузки, или адаптивное изменение в зависимости от текущей нагрузки.

**Интерфейс ТфОП** реализуется в транкинговых системах различными способами. В недорогих системах (напр., SmartTrunk) подключение производится по двухпроводной коммутируемой линии. Более современные транкинговые системы имеют в составе интерфейса ТфОП аппаратуру прямого набора номера DID (Direct Inward Dialing), обеспечивающую доступ к абонентам транкинговой сети с использованием стандартной нумерации абонентской телефонной станции (АТС). Ряд транкинговых систем, претендующих на высокое качество обслуживания, использует цифровое ИКМ-соединение с аппаратурой АТС.

Соединение с ТфОП является традиционным для транкинговых систем, но в последнее время все более возрастает число приложений, предполагающих передачу данных, в связи с чем наличие интерфейса сети с коммутацией пакетов становится обязательным.

**Терминал технического обслуживания и эксплуатации** (терминал O&M) располагается, как правило, на базовой станции однозоновой сети. Терминал предназначен для контроля за состоянием системы, проведения диагностики неисправностей, учета тарификационной информации, внесения изменений в базу данных абонентов. Подавляющее большинство выпускаемых и разрабатываемых транкинговых систем имеют возможность удаленного подключения терминала O&M через ТфОП или сеть с коммутацией пакетов (СКП).

**Диспетчерский пульт.** Необязательными, но очень характерными элементами инфраструктуры транкинговой системы являются диспетчерские пульта. Дело в том, что транкинговые системы используются в первую очередь теми потребителями, чья работа не обходится без диспетчера - службы охраны правопорядка, скорая медицинская помощь, пожарная охрана, транспортные компании, муниципальные службы. Диспетчерские пульта могут включаться в систему по абонентским радиоканалам, или подключаться по выделенным линиям непосредственно к коммутатору базовой станции. Следует отметить, что в рамках одной транкинговой системы может быть организовано несколько независимых сетей связи. Пользователи каждой из таких сетей не будут замечать работу соседей, и что не менее важно, не смогут вмешиваться в работу других сетей. Поэтому, в одной транкинговой системе могут работать несколько диспетчерских пультов, различным образом подключенных к ней.

**Абонентское оборудование** транкинговых систем включает в себя широкий набор устройств. Как правило, наиболее многочисленными являются *полудуплексные радиостанции* - именно они в наибольшей степени подходят для работы в замкнутых группах. В большинстве своем это функционально ограниченные устройства, не имеющие цифровой клавиатуры. Их пользователи имеют возможность связываться лишь с абонентами внутри своей рабочей группы, а также посылать экстренные вызовы диспетчеру. Впрочем, этого вполне достаточно для большинства потребителей услуг связи транкинговых систем. Встречаются и полудуплексные радиостанции с широким набором функций и цифровой клавиатурой, но они, будучи заметно дороже, предназначены для более узкого привилегированного круга абонентов.

В транкинговых системах постепенно приживается новый класс абонентских устройств - *дуплексные радиостанции*, скорее напоминающие сотовые телефоны, но обладающие значительно большей функциональностью по сравнению с последними. Дуплексные радиостанции транкинговых систем обеспечивают пользователям не только полноценное соединение с ТфОП, но и возможность групповой работы в полудуплексном режиме. Эти радиостанции предназначены в первую очередь для персонала высшего звена управления компаний, использующих транкинговые системы для организации корпоративных сетей. Стоимость дуплексных транкинговых радиостанций значительно выше, чем сотовых телефонов: от \$ 1500 (аналоговая) до \$ 2500 (цифровая). Несмотря на высокую цену, применение дуплексных транкинговых радиостанций позволяет в большинстве случаев интегрировать все необходимые руководителю средства связи в одном устройстве.

Как полудуплексные, так и дуплексные транкинговые радиостанции выпускаются не только в портативном, но и в автомобильном исполнении. Как правило, выходная мощность передатчиков автомобильных радиостанций выше.

Относительно новым классом устройств для транкинговых систем являются *терминалы передачи данных*. В аналоговых транкинговых системах терминалы передачи данных - это специализированные радиомодемы, поддерживающие соответствующий протокол радиointерфейса. Для цифровых систем более характерно встраивание интерфейса передачи данных в абонентские радиостанции различных классов. Как правило, это асинхронный интерфейс типа RS-232. В состав автомобильного терминала передачи данных часто включают спутниковый навигационный приемник системы Global Position System (GPS), предназначенный для определения текущих координат и последующей передачи их диспетчеру на пульт.

В транкинговых системах используются также *стационарные радиостанции*, преимущественно для подключения диспетчерских пультов. Выходная мощность

передатчиков стационарных радиостанций приблизительно такая же, как у автомобильных радиостанций.

### Многозоновые системы.

Наиболее ранние стандарты транкинговых систем не предусматривали каких-либо механизмов взаимодействия различных зон обслуживания. Архитектура многозоновых транкинговых систем может строиться по двум различным принципам. В том случае, если определяющим фактором является стоимость оборудования, используется *распределенная межзональная коммутация*. Структура такой системы показана на рисунке 2.2. Каждая базовая станция в такой системе имеет свое собственное подключение к ТфОП. Этого уже вполне достаточно для организации многозоновой системы - при необходимости вызова из одной зоны в другую он производится через интерфейс ТфОП, включая процедуру набора телефонного номера. Кроме того, базовые станции могут быть непосредственно соединены с помощью физических выделенных линий связи (чаще всего используются малоканальные радиорелейные линии). Лишь в последнее время сети с коммутацией пакетов стали рассматриваться как средство объединения зон для транкинговых систем. Так, в новейшей цифровой системе DigiStar фирмы Digital Wireless Corporation в качестве опорной сети для объединения зон может использоваться любая сеть с коммутацией пакетов, поддерживающая протокол IP, в том числе глобальная сеть Интернет. Принимая во внимание тот факт, что стоимость доступа к Интернет намного ниже стоимости междугородной телефонной связи, и уж тем более ниже стоимости установки собственных выделенных физических линий, решение фирмы Digital Wireless Corporation нельзя не признать заслуживающим внимания.

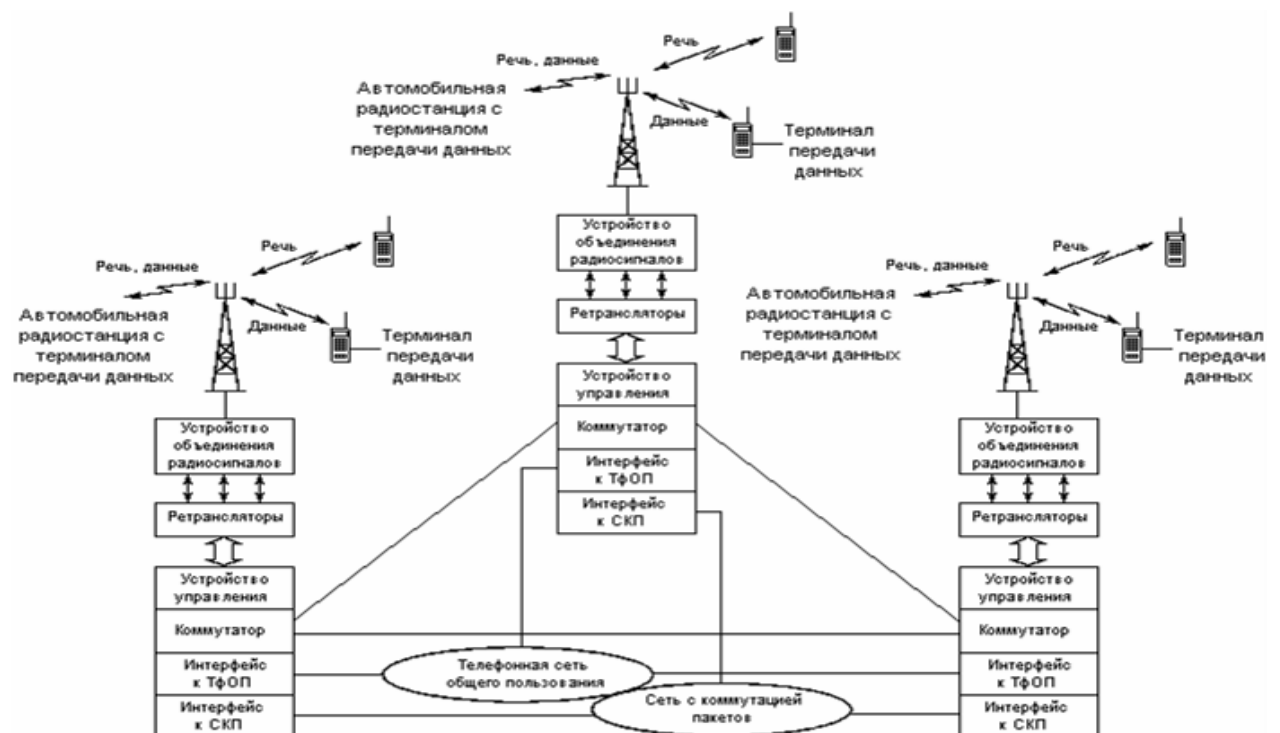


Рис. 3.22. Обобщенная структура транкинговой системы с распределенной межзональной коммутацией

Все же, использование распределенной межзональной коммутации пригодно лишь для систем с небольшим количеством зон и с невысокими требованиями к оперативности трансзональных вызовов (особенно в случае соединения через коммутируемые каналы ТфОП). В системах с высоким качеством обслуживания используется другая архитектура многозоновых систем - архитектура с *централизованной коммутацией*. Структура многозоновой транкинговой системы с централизованной коммутацией показана на рисунке 2.23.

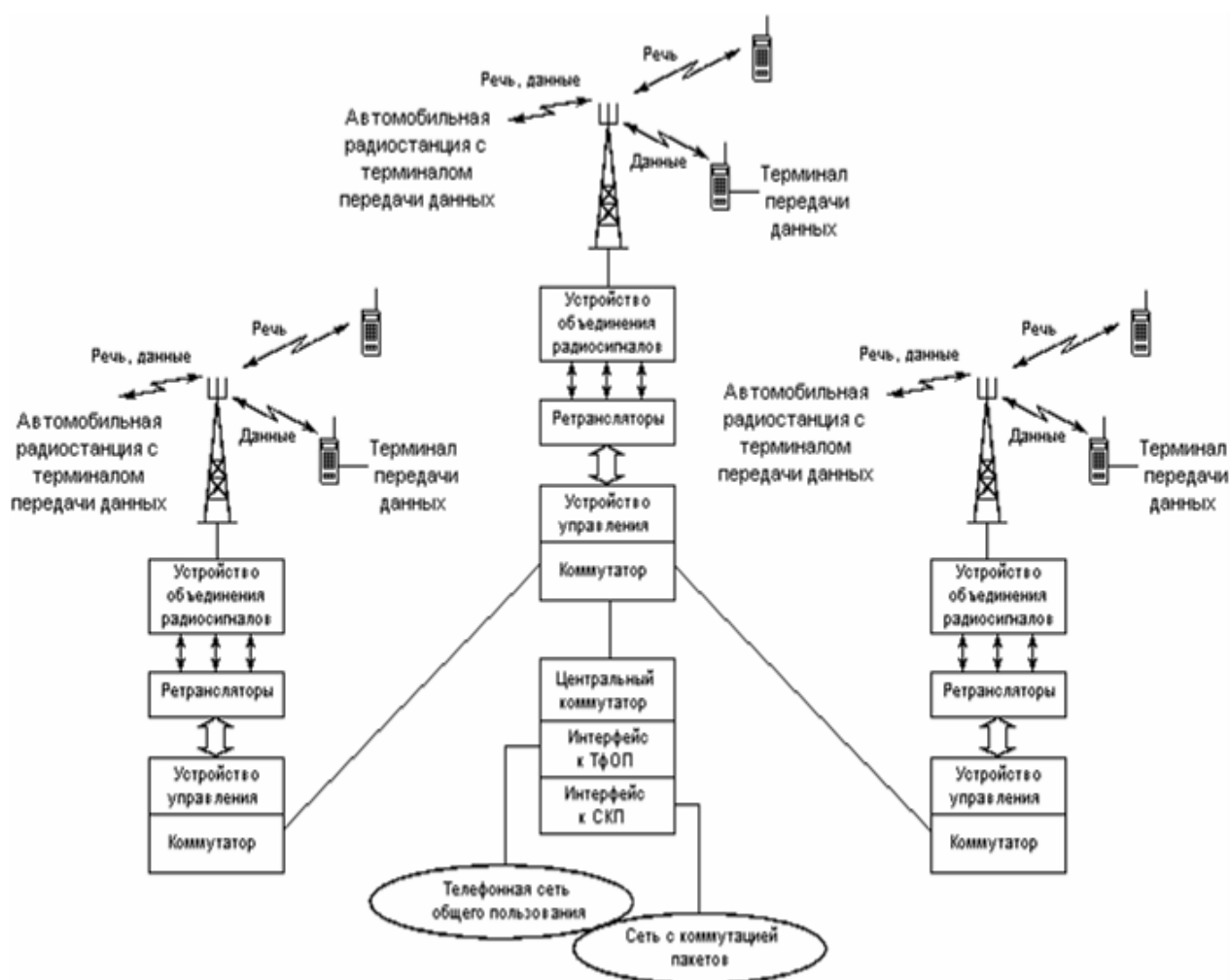


Рис. 3.23. Обобщенная структура транкинговой системы с централизованной межзональной коммутацией

Важнейший элемент этой схемы - межзональный коммутатор. Он обрабатывает все виды трансзональных вызовов. Таким образом, весь межзональный трафик проходит через один коммутатор, соединенный с базовыми станциями по выделенным линиям. Это обеспечивает быструю обработку вызовов, возможность подключения

централизованных диспетчерских пультов. Информация о местонахождении абонентов системы с централизованной коммутацией хранится в единственном месте, поэтому ее легче защитить. Кроме того, межзональный коммутатор осуществляет также функции централизованного интерфейса ТфОП и СКП, что позволяет при необходимости полностью контролировать как речевой трафик телефонной сети, так и трафик всех приложений передачи данных, связанный с внешними СКП, например Интернет. Таким образом, система с централизованной коммутацией обладает более высокой управляемостью. За все эти преимущества приходится дорого платить - стоимость одного только коммутатора составляет сотни тысяч долларов, а ведь нужно еще обеспечить его подключение к базовым станциям по выделенным линиям.

Итак, можно выделить несколько важнейших архитектурных признаков, присущих транкинговым системам. Во-первых, это ограниченная (а значит, дорогая) инфраструктура. В многозоновых транкинговых системах она более развита, но все равно не идет ни в какое сравнение с мощностью инфраструктуры сотовых сетей.

Во-вторых, это большой пространственный охват зон обслуживания базовых станций - объясняется необходимостью поддержания групповой работы на обширных территориях и требованиями минимизации стоимости системы. В сотовых сетях, где инвестиции в инфраструктуру быстро окупаются, а трафик растет, базовые станции размещаются все более плотно, с малым радиусом зон покрытия (сот). При развертывании транкинговых систем все обстоит несколько иначе - объем финансирования, как правило, ограничен, и для достижения высокой эффективности капиталовложений нужно обслужить с помощью одного комплекта оборудования базовой станции возможно более обширную территорию.

В-третьих, широкий набор абонентского оборудования позволяет транкинговым системам охватить практически весь спектр потребностей корпоративного потребителя в подвижной связи. Возможность обслуживания разнородных по функциональному назначению устройств в единой системе - еще один путь к минимизации расходов.

В-четвертых, транкинговые системы позволяют на базе своих каналов организовать независимые выделенные сети связи (или, как принято говорить в последнее время, частные виртуальные сети). Это означает, что несколько организаций могут совместными усилиями развернуть единую систему, вместо установки отдельных систем. Таким образом, достигается ощутимая экономия радиочастотного ресурса, а также снижение стоимости инфраструктуры.

Таким образом, все архитектурные признаки транкинговых систем свидетельствуют о прочности позиций последних в корпоративном секторе рынка систем и средств подвижной связи.



## Службы транкинговых систем

Транкинговые системы связи характеризуются широким разнообразием служб, обеспечивающих работу различного оборудования, а также поддержку сетей связи внутри этих систем. Наиболее важной и наиболее часто используемой службой транкинговых систем является служба внутренних вызовов.

### Внутренние вызовы.

Транкинговые сети предоставляют абонентам возможность производить различные типы вызовов внутри системы: индивидуальный (персональный) и групповой (диспетчерский). В первом случае вызов направляется только одному абоненту, во втором - нескольким абонентам.

Основным типом вызова в транкинговых системах является групповой вызов в рамках одной группы (см. рис.2.4). Групповой вызов принципиально может быть произведен только в полудуплексном режиме - пока вызывающий абонент говорит и его радиостанция находится в режиме передачи, все остальные члены группы принимают речь вызывающего абонента. Таким образом, реплика любого члена группы автоматически становится слышимой всеми участниками группы. Групповой вызов может производиться с самой простой (а следовательно, недорогой) полудуплексной радиостанции - для этого пользователю достаточно, как правило, лишь нажать на кнопку "Передача". Вхождение в связь с ретранслятором и группой абонентов производится в этом случае автоматически. Этот тип вызова обеспечивают все известные транкинговые системы.

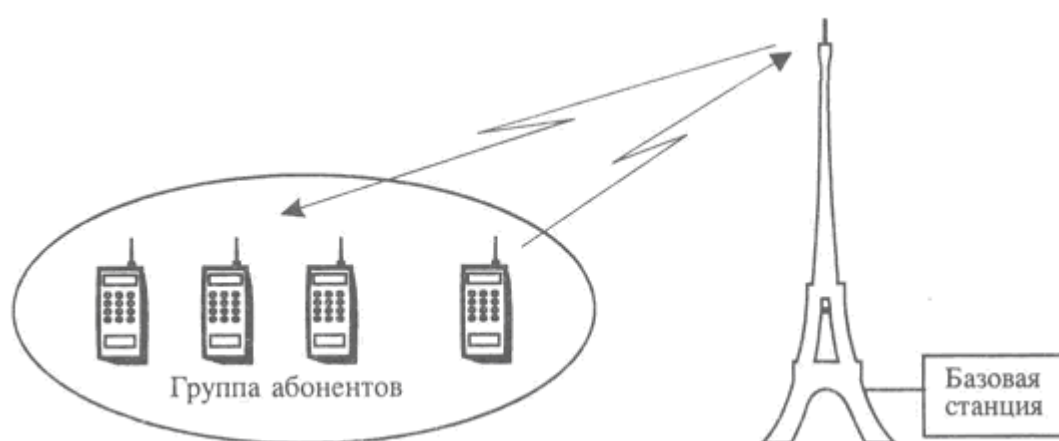


Рис. 3.24. Групповой вызов

В большинстве существующих транкинговых систем предусмотрена возможность одновременного вызова абонентов нескольких групп. К числу таких вызовов относятся общий вызов (all call), экстренный вызов (от диспетчера). В некоторых системах используется иерархическое вложение групп и предусматриваются соответствующие типы вызовов: многоуровневый, многогрупповой и т.д. Как правило, право

производить столь сложные вызовы предоставляется только диспетчеру. Некоторые системы обеспечивают возможность соединения с произвольно выбранной группой, причем не только для абонента транкинговой системы (см. рис.2.5), но и для абонента телефонной сети общего пользования (см. рис.2.6).

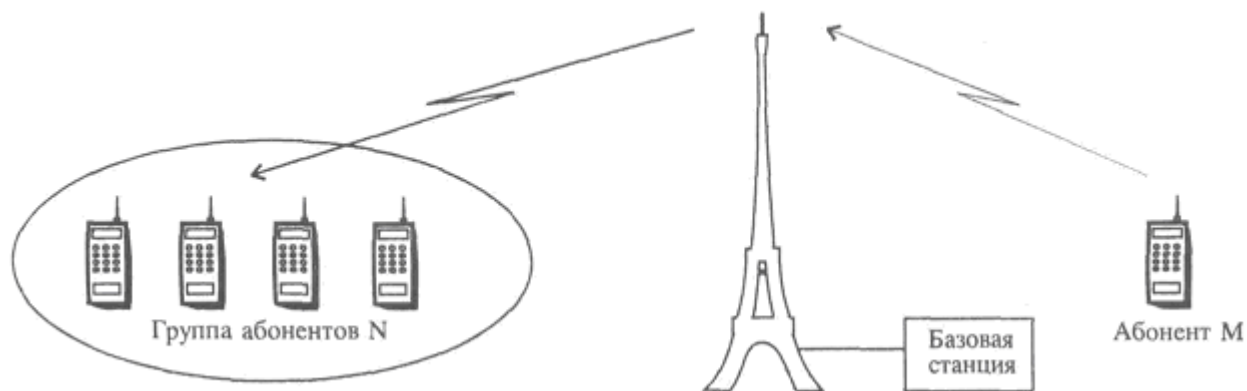


Рис. 3.25. Вызов произвольно выбранной группы



Рис. 3.26. Вызов группы из ТФОП

Персональный внутренний вызов (см. рис. 3.27) является более привилегированным типом вызова. Для его послышки пользователь должен использовать радиостанцию с цифровой клавиатурой. Персональный внутренний вызов может быть произведен не только в полудуплексном, но и в дуплексном режиме (разумеется, если абонентские радиостанции также являются дуплексными).

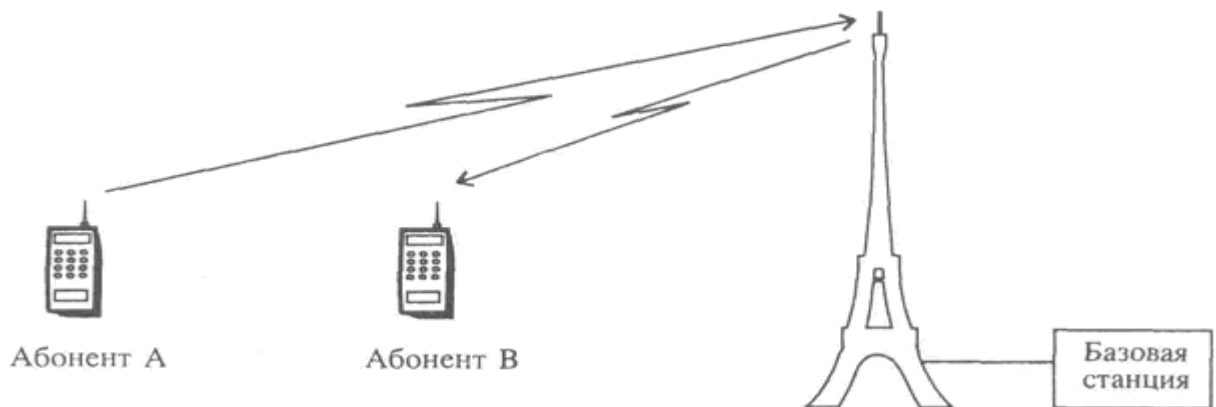


Рис. 3.27. Персональный вызов

Существует еще одна специфическая разновидность внутренних вызовов - статусные вызовы. Они служат заменой тривиальным репликам, таким как "вас понял", "повторите" и т.п. Вместо речевого ответа абонент может нажать соответствующую функциональную кнопку, что вызовет передачу короткого цифрового сообщения. Применение статусных вызовов позволяет существенно уменьшить загрузку системы, т.к. в условиях диспетчерской связи и групповой работы такие реплики употребляются очень часто.

#### **Приоритетные вызовы.**

Многие транкинговые системы предусматривают обработку вызовов с несколькими уровнями приоритета. Так, в системе DigiStar предусмотрено 10 уровней приоритета, в системе EDACS - 8 уровней. Разграничение приоритетов может использоваться в различных целях: предоставление привилегий отдельным абонентам или группам, а также оптимизация обработки трафика. В любом случае, влияние приоритетной обработки вызовов начинает сказываться только при высокой загрузке системы.

Оптимизация обработки трафика заключается в том, что вызовам абонентов, уже начавших и продолжающих разговор, присваивается более высокий приоритет, чем вызовам абонентов, только устанавливающих соединение. Таким образом, ценой некоторого увеличения времени на первое установление соединения минимизируется продолжительность пауз в разговоре абонентов, что в конечном счете ведет к улучшению комфортности радиопереговоров.

Некоторые системы предусматривают наделение ряда абонентов правом вызова сверхвысокого приоритета, или так называемого вытесняющего вызова. При поступлении такого вызова в ситуации, когда все ретрансляционные ресурсы заняты (т.е. в ситуации блокирования), одно из текущих соединений прерывается, а освободившийся ресурс отводится для обслуживания поступившего вызова со сверхвысоким приоритетом.

Существует еще один тип приоритетной обработки вызовов - предоставление так называемого открытого канала, заключающееся во временном переключении одного из каналов в монопольное владение одной группы абонентов. Это позволяет группе получить гарантированный и быстрый доступ к ретранслятору. Предоставление открытого канала является средством, используемым лишь в исключительных ситуациях и доступным для крайне ограниченного круга пользователей. Включение режима открытого канала приносит заметные неудобства остальным абонентам системы - за счет уменьшения числа разделяемых каналов ухудшается качество обслуживания, особенно в ситуации тяжелой нагрузки.

### **Доступ к ТфОП**

Как правило, доступ к ТфОП имеют лишь немногие абоненты транкинговых систем. Вызов абонента ТфОП может быть произведен только с радиостанции, имеющей цифровую клавиатуру. Для доступа к ТфОП лучше всего использовать дуплексную радиостанцию, поскольку сама ТфОП работает в дуплексном режиме. Вместе с тем, практически все известные транкинговые системы предоставляют возможность доступа к ТфОП с помощью полудуплексных радиостанций. Следует заметить, что в России для вновь устанавливаемых систем допускается только дуплексное соединение.

Абонент ТфОП может вызывать не только отдельного абонента транкинговой системы, но и группу абонентов. Процедура вызова для абонентов ТфОП может быть двухступенчатой (в том случае, если интерфейс ТфОП подключен к телефонной сети с помощью двухпроводной коммутируемой линии), или одноступенчатой (при подключении интерфейса ТфОП по методу Direct ID). При двухступенчатой процедуре абонент ТфОП должен сначала набрать номер телефона, к которому подключен интерфейс ТфОП, а затем - номер абонента внутри транкинговой системы. Поскольку в этом случае набор номера абонента транкинговой системы происходит в условиях установленного соединения через ТфОП, часто (особенно в России) сопровождающегося импульсными и другими помехами, вероятность ошибочного соединения или обрыва связи относительно высока. Поэтому, все вновь разрабатываемые системы и стандарты предполагают использование метода Direct ID, позволяющего организовать доступ из ТфОП с использованием единой системы нумерации абонентов. Абоненту ТфОП для вызова абонента транкинговой системы, оснащенной аппаратурой Direct ID, достаточно набрать обычный городской телефонный номер, также как и в сотовой сети.

### **Роуминг.**

В многозоновых транкинговых системах осуществляется отслеживание текущего расположения абонентов. При перемещении абонента из одной зоны в другую обеспечивается регистрация и назначение новых каналов доступа. В системах с распределенной коммутацией каждая базовая станция самостоятельно осуществляет коммутацию поступающих вызовов. В системах с централизованной коммутацией роуминг более надежен, а скорость обработки межзональных вызовов выше.

Для большинства транкинговых систем характерно прерывание связи при перемещении абонента из одной зоны обслуживания в другую (hard hand-over), связанное с отсутствием механизма эстафетной передачи. Для продолжения разговора абонент вынужден повторять вызов. Вместе с тем, при полудуплексном режиме работы, когда каждая новая реплика передается с помощью отдельного вызова, межзональный переход практически незаметен. Все же, требования пользователей транкинговых систем растут, и в новейших цифровых системах TETRA и EDACS ProtoCALL обеспечивается эстафетная передача.

Особый аспект роуминга в транкинговых системах - обслуживание многозональных групповых вызовов. Отслеживая перемещения абонентов, система при поступлении группового вызова обеспечивает его доведение до всех членов группы, в какой бы зоне они не находились.

#### **Передача данных.**

В транкинговых системах передача данных является дополнительной службой, поэтому до последнего времени не получила развитых средств поддержки. Скорость передачи данных во всех аналоговых системах лежит в пределах 0,6 - 4,8 кбит/с. Как правило, аналоговые транкинговые системы лишь предоставляют каналы для передачи данных, не обеспечивая сетевую маршрутизацию. В то же время для цифровых транкинговых систем передача данных является значительно более родственной службой. Цифровые транкинговые системы предоставляют сервис не только канального, но и сетевого уровня, а в ряде случаев - и транспортного. Возможна поддержка наложенных сетей, например IP-сетей. Пользовательская скорость передачи данных для цифровых систем может варьироваться в широких пределах. Так, новейший стандарт TETRA предусматривает скорость до 28,8 кбит/с. При проектировании собственных сетей передачи данных на базе цифровых транкинговых систем пользователю предоставляется, как правило, возможность выбора параметров протокола канального и транспортного уровня, а также возможность использования датаграмм.

Оборудование базовых станций или центрального коммутатора цифровых транкинговых систем осуществляет также функции шлюза с внешними сетями

передачи данных, т.е. сетями с коммутацией пакетов. В функции шлюза входит конвертирование протоколов, включая взаимное преобразование адресов внутренней и внешней сетей, а также поддержание наложенной сети.

Важнейшая область применения служб передачи данных - организация в рамках транкинговых систем сетей дистанционного мониторинга и контроля местоположения подвижных объектов.

#### **Режим непосредственной связи.**

В некоторых транкинговых системах предусмотрена возможность непосредственной связи абонентов без участия ретранслятора. Этот режим, называемый также talk around или direct mode operation, используется в том случае, если один или несколько абонентов вышли из зоны действия всех ретрансляторов системы (см. рис. 3.28).

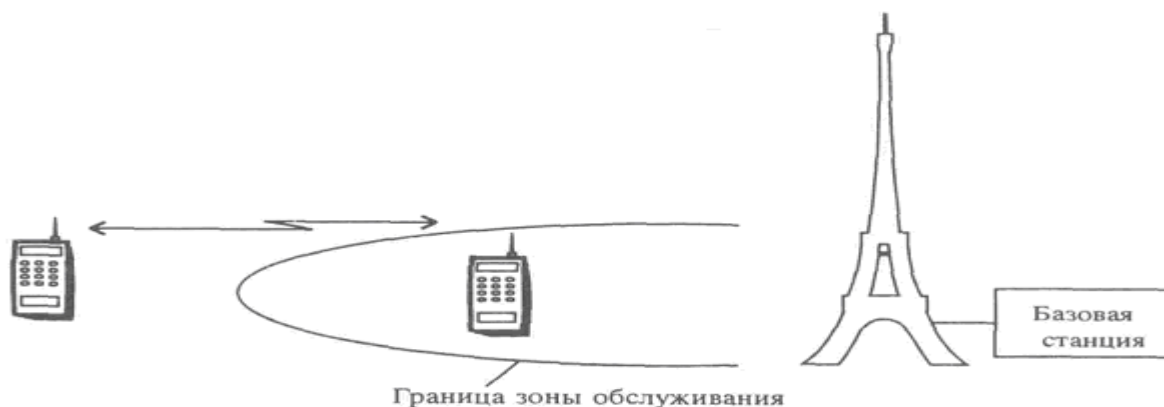


Рис. 3.28. Режим непосредственной связи

#### **Тарификация (биллинг).**

Оборудование транкинговых систем позволяет вести учет и тарификацию соединений с получением подробной информации по каждому соединению. В данные по учету и тарификации могут входить следующие параметры: идентификаторы вызывающего и вызываемого абонентов, время и дата начала установления соединения, длительность соединения, тип вызова (индивидуальный, групповой и др.), категория приоритета (обычный или высокий и др.).

В транкинговых системах могут задаваться несколько тарифных периодов для разных дней недели и времени суток.

Данные биллинга могут использоваться для документирования связи и предоставления счетов абонентам, а также для выявления попыток несанкционированного доступа.

#### **Удаленное управление абонентскими радиостанциями.**

Ряд транкинговых систем предоставляет оператору возможность оперативного изменения параметров доступа абонентских радиостанций. Так, в системе EDACS можно дистанционно перепрограммировать сетевой идентификатор (ID), частоты каналов, а также переконфигурировать группы абонентов. Удаленное управление используется также в целях борьбы с попытками несанкционированного доступа, что особенно важно в случае хищения абонентского оборудования. В системах стандарта SmartTrunk II имеется так называемый радиокиллер: при посылке специальной команды в абонентской радиостанции происходят необратимые изменения, превращающие ее в бесполезную игрушку.

### **Классификация транкинговых систем**

Для классифицирования транкинговых систем связи можно использовать следующие признаки.

#### **Метод передачи речевой информации.**

По методу передачи речевой информации транкинговые системы подразделяются на аналоговые и цифровые. Передача речи в радиоканале аналоговых систем осуществляется с использованием частотной модуляции, а шаг сетки частот обычно составляет 12,5 кГц или 25 кГц. Для передачи речи в цифровых системах используются различные типы вокодеров, преобразующих аналоговый речевой сигнал в цифровой поток со скоростью не более 4,8 кбит/с.

#### **Количество зон.**

В зависимости от количества базовых станций и общей архитектуры различают однозоновые или многозоновые системы. Первые располагают лишь одной базовой станцией, вторые - несколькими БС с возможностью роуминга.

#### **Метод объединения базовых станций в многозоновых системах.**

Базовые станции в транкинговых системах могут объединяться с помощью единого коммутатора (системы с централизованной коммутацией), либо соединяться друг с другом непосредственно или через сети общего пользования (системы с распределенной коммутацией).

#### **Тип многостанционного доступа.**

В подавляющем большинстве транкинговых систем используется многостанционный доступ с частотным разделением (МДЧР), включая цифровые системы. Для систем МДЧР справедливо соотношение "одна несущая - один канал". Комбинация МДЧР и многостанционного доступа с временным разделением (МДВР) используется в системах стандарта TETRA, а также является факультативной возможностью системы EDACS ProtoCALL.

### **Способ поиска и назначения канала.**

По способу поиска и назначения канала различают системы с децентрализованным и централизованным управлением. В первых процедуру поиска свободного канала выполняют абонентские радиостанции. В этих системах ретрансляторы базовой станции обычно не связаны друг с другом и работают независимо. Особенностью систем с децентрализованным управлением является относительно большое время установления соединения между абонентами, растущее с увеличением числа ретрансляторов. Такая зависимость вызвана тем, что абонентские радиостанции вынуждены непрерывно последовательно сканировать каналы в поисках вызывного сигнала (последний может поступить от любого ретранслятора) или свободного канала (если абонент сам посылает вызов). Наиболее характерными представителями данного класса являются системы стандарта SmartTrunk.

В системах с централизованным управлением поиск и назначение свободного канала производится на базовой станции. Для обеспечения нормального функционирования таких систем организуются каналы двух типов: рабочие (traffic channel) и управления (control channel). Все запросы на предоставление связи направляются по каналу управления, по этому же каналу базовая станция извещает абонентские устройства о назначении канала, отклонении запроса, либо о постановке запроса в очередь.

### **Тип канала управления.**

Во всех транкинговых системах каналы управления являются цифровыми. Различают системы с выделенным частотным каналом управления и системы с распределенным каналом управления. В системах первого типа передача данных в канале управления производится со скоростью до 9,6 кбит/с, а для разрешения конфликтов используются протоколы типа ALOHA.

Выделенный канал управления имеют транкинговые системы фирмы Motorola: StartSite, SmartNet, SmartZone, система EDACS фирмы Ericsson и некоторые другие. В системах с распределенным каналом управления информация о состоянии системы и поступающих вызовах распределена между низкоскоростными субканалами передачи данных, совмещенными со всеми рабочими каналами. Таким образом, в каждом частотном канале системы передается не только речь, но и данные канала управления. Для организации парциального канала в аналоговых системах обычно используется субтональный диапазон частот 0 - 300 Гц. Наиболее характерными представителями данного класса являются системы LTR и Multi-Net фирмы E.F.Johnson.

### **Способ удержания канала.**



Транкинговые системы позволяют абонентам удерживать канал связи на протяжении всего разговора, или только на время передачи. Первый способ, называемый также транкингом сообщений (message trunking), наиболее традиционен для систем связи, и обязательно используется во всех случаях применения дуплексной связи или соединения с ТфОП.

Второй способ может быть реализован только при использовании полудуплексных радиостанций. В последних передатчик включается только на время произнесения абонентом фраз разговора. В паузах между окончанием фраз одного абонента и началом ответных фраз другого передатчики обеих радиостанций выключены. Значительная часть транкинговых систем эффективно использует такие паузы, освобождая канал немедленно после окончания работы передатчика абонентской радиостанции. Реплики одного и того же разговора могут передаваться по разным каналам. Такой метод обслуживания, предусматривающий удержание канала только на время передачи, называется транкингом передачи (transmission trunking). Платой за высокую эффективность данного метода служит снижение комфортности переговоров - в состоянии высокой нагрузки канал предоставляется с некоторой задержкой, что приводит к фрагментарности и раздробленности разговора.

Транкинговые системы, при всем своем универсализме, занимают вполне определенную нишу на рынке систем подвижной связи. Это отчетливо заметно при сопоставлении параметров различных типов систем, доминирующих на рынке (см. табл. 2.2). К таковым относятся обычные<sup>1</sup> (неавтоматизированные), транкинговые и сотовые системы.

До появления транкинговых систем корпоративный сектор рынка практически полностью был занят обычными системами. Поскольку транкинговые системы ориентированы на тот же сектор, можно найти много общих черт между ними и обычными системами. Так, в частности, радиус зон обслуживания как в транкинговых, так и в обычных системах делается максимально возможным и зависит в основном от высоты подвеса антенн базовых станций. В сотовых системах, напротив, по мере роста числа абонентов приходится уменьшать радиусы зон, с тем чтобы увеличить количество доступных каналов связи на обслуживаемой территории. Таким образом, использование технологии МДВР/МДЧР, предусматривающей уменьшение зон по сравнению с МДЧР, в наибольшей степени отвечает принципам создания именно сотовых систем. Нижнее значение радиуса зон в транкинговых системах, равное приблизительно 5 км, дают системы МДВР/МДЧР, такие как TETRA и EDACS

ProtoCALL. Для остальных транкинговых систем, использующих только МДЧР, характерны значительно большие радиусы зон.

В обычных системах возможен только один тип вызова - групповой. Сотовые системы, наоборот, поддерживают лишь индивидуальные вызовы. Спецификации некоторых стандартов сотовых систем (к ним относится GSM, являющийся федеральным стандартом России) и соответствующая аппаратура поддерживают режим телеконференций, но он не является прямым аналогом группового вызова, к тому же региональные операторы редко разрешают его использование. Транкинговые системы, как уже было показано в предыдущем разделе, предусматривают обслуживание групповых и индивидуальных вызовов, а также множества их разновидностей.

Таблица 3.5

Параметры системы	обычная	транкинговая	сотовая
Конфигурация	однозоновая	однозоновая, многозоновая	многозоновая
Радиус зоны, км	20-80	5-80	0,3-10
Тип вызова	групповой	индивидуальный, групповой	индивидуальный
Метод посылки вызова	Нажатие кнопки "Передача"	нажатие кнопки "Передача", набор номера	набор номера
Режим радиосвязи	Полудуплекс	Полудуплекс, дуплекс	Дуплекс
Внутрисистемный трафик	100%	50% - 95%	3% - 15%
Роуминг	-	есть	есть
Режим переключения каналов при смене зоны	-	жесткий, мягкий	мягкий
Среднее число абонентов на канал	до 30	50-100	до 30

Наиболее удобным способом посылки группового вызова является нажатие на кнопку "Передача". Для обычных систем этот способ является также и единственным. В транкинговых системах нажатие на кнопку "Передача" приводит к запуску процедуры установления соединения с базовой станцией, в ходе которой устройству управления БС сообщается идентификатор вызываемой группы. Базовая станция назначает канал связи и уведомляет об этом как радиостанцию вызывающего абонента, так и радиостанции остальных абонентов группы. После этого радиостанция

вызывающего абонента переходит в режим передачи речи на назначенном канале. Процесс вхождения в связь и установления соединения проходит в течение 0,2 - 0,3 сек., т.е. незаметно для абонента. Для вызова произвольно выбранной группы, посылки индивидуального вызова, а также при соединении с ТфОП в транкинговых системах используется набор номера. Таким образом, транкинговые системы позволяют использовать в каждом случае тот метод посылки вызова, который в наибольшей степени отвечает ситуации. В сотовых системах, являющихся расширением ТфОП, единственным средством посылки вызова является набор номера.

В то время как доля внутрисистемного трафика в сотовых системах всегда незначительна и лишь в исключительных случаях поднимается до уровня в 15%, для транкинговых систем этот показатель сильно различается от одной сети к другой. Если транкинговая система используется преимущественно в целях внутрикорпоративной и ведомственной связи, а право доступа к ТфОП предоставлено лишь отдельным абонентам, внутрисистемный трафик может достигать 95%, и проблема перегрузки интерфейса ТфОП не будет доставлять хлопот оператору. В случае, если оператор предоставляет услугу доступа к ТфОП частным потребителям, конкурируя с сотовой сетью или (за неимением) заменяя ее, что является обычной практикой в России, внутрисистемный трафик может упасть до 50% и даже ниже. При этом количество каналов интерфейса ТфОП должно соответствовать количеству радиоканалов и соотношению внутреннего и полного трафика.

Роуминг используется как в сотовых, так и в транкинговых системах, но его реализации существенно различаются. Если в сотовых системах изначально закладывалась возможность организации глобальных сетей с автоматическим роумингом, то разработчики транкинговых систем до недавних пор ограничивали роуминг пределами одной системы. Лишь в последних системах и стандартах транкинговой связи – EDACS ProtoCALL, APCO25 и TETRA - обеспечивается возможность межсистемного роуминга. То же относится и к поддержке эстафетной передачи абонента от одной базовой станции к другой. Большинство транкинговых систем не имеют такой возможности. Среднее число абонентов на канал является важнейшей интегральной характеристикой любой системы подвижной связи. Несмотря на то, что характер нагрузки в обычных и транкинговых системах почти совпадает, отсутствие механизма автоматического доступа к свободному каналу у первых не позволяет достичь им значения в 100 абонентов на канал. Что касается сотовых систем, невысокое значение этого параметра объясняется большим уровнем трафика, создаваемым абонентами при телефонных переговорах.

## **Стандарты транкинговых систем**

Выбор базового варианта и стандарта должен основываться, прежде всего, на соответствии технических возможностей проектируемой системы требуемым: максимальная емкость системы, возможное количество зон обслуживания и каналов, набор сервисных функций, подключение к телефонной сети общего пользования и т.д.

Известно, что по методу передачи речевой информации транкинговые системы подразделяются на аналоговые и цифровые. Сразу же следует оговориться, что будем рассматривать только открытые стандарты, так как открытость технологии, в первую очередь указывает на то, что спецификации стандарта доступны всем желающим, и любой производитель может наладить выпуск такого оборудования. А это означает адекватный уровень цен и независимость заказчика от позиции конкретного производителя. Кроме того, открытость предусматривает совместимость и взаимодействие оборудования разных производителей

Рассмотрим сначала аналоговые стандарты.

В настоящее время и в мире, и в России достаточно широко распространены появившиеся ранее аналоговые транкинговые системы радиосвязи, такие как SmartTrunk, системы протокола MPT1327 (ACCESSNET, ACTIONET и др.), системы фирмы Motorola (Startsite, Smartnet, Smartzone), системы с распределенным каналом управления (LTR и Multi-Net фирмы E.F.Johnson Co и ESAS фирмы Uniden). Наибольшее распространение получили системы MPT1327, что объясняется значительными преимуществами данного стандарта по сравнению с другими аналоговыми систе

### **Аналоговая транкинговая система MPT1327**

Транкинговая система MPT1327 является оптимальным решением для построения ведомственных и коммерческих систем радиотелефонной связи, работающих в небольшом географическом районе и имеющих не более 5000 абонентов (система поддерживает до 5000 индивидуальных идентификаторов и до 2000 групповых). Система может быть построена в как в однозональном варианте (до 24 каналов в базовой станции), так и в многозональном (до 12 базовых станций). Основными потребителями системы являются предприятия нефтегазового комплекса, крупные промышленные предприятия, такие ведомства как РЕЧФЛОТ, МОРФЛОТ (наземное обслуживание), коммунальные и аварийные службы, подразделения Скорой помощи и служб общественной безопасности, операторы системы «АЛТАЙ».

Идеология предлагаемой системы строится на четырех основных принципах:

- Использование открытого стандарта MPT1327.
- Устойчивость системы. Ни один из модулей системы не может быть причиной выхода ее из строя. Потеря одного из контроллеров или ретранслятора лишь снижает количество рабочих каналов системы.
- Экономическая эффективность. При построении системы не требуется применение центрального коммутатора, что особенно важно для небольших систем.
- Модульность и расширяемость. Простое добавление каналов системы (контроллеров и ретрансляторов) позволяет постепенно расширять систему.

Система полностью соответствует протоколам MPT1327/1343, поэтому к основным возможностям системы можно отнести основные возможности этого стандарта:

- полная совместимость с абонентским оборудованием, работающим в протоколе MPT1327;
- поддержка всех видов вызовов MPT1327 и их приоритетности (индивидуальный и групповой вызовы, вызов для оповещения, обычный, приоритетный, аварийные вызовы и пр.);
  - передача статусных сообщений;
  - передача коротких блоков данных (до 184 бит);
  - передача данных произвольного размера по протоколу MAP27;
  - подключение к телефонной сети в каждой зоне обслуживания;
  - регистрация и полная проверка электронного серийного номера (ESN) абонента;
  - постановка в очередь при занятости системы, телефонной линии или вызываемого абонента;
  - переадресация вызовов, роуминг;
  - защита от несанкционированного доступа;

К особенностям системы можно отнести следующее:

- распределенная архитектура системы;
- все радиоканалы имеют равный доступ ко всем телефонным интерфейсам системы;
  - широкие возможности программирования и настройки телефонных интерфейсов;
  - дистанционный контроль и управление через встроенный модем;
  - объединение в одном блоке контроллера радиоканала, базы данных абонентов системы, телефонного интерфейса или интерфейса межбазовых соединений;

- поддержка дуплексных абонентских станций;
- цифровая обработка речевого сигнала;
- возможность подключения к системе обычных конвенциональных сетей;
- возможность построения различных конфигураций в многозоновом варианте системы (типа "звезда", "круг", "линия", соединение каждой базовой станции со всеми базовыми станциями).

Основными преимуществами предлагаемой транкинговой системы является ее простота, надежность, а также эффективность и доступность. Существующее на рынке представление о том, что любая система, работающая в протоколе МРТ1327, является очень дорогостоящей и сложной, уже не актуально. Модульная конструкция системы, позволяющая наращивать количество каналов в базовой станции (до 24), а также отсутствие центрального коммутатора системы, которое компенсируется распределением его функций между контроллерами системы, соединенными цифровой шиной, позволяет существенно снизить затраты и упростить систему. Доступность системы определяется прежде всего тем, что отсутствует центральный коммутатор, а также тем, что цены на абонентские станции МРТ1327 существенно снизились за последнее время. Удельная стоимость в расчете на одного абонента (с учетом стоимости полного комплекта базового оборудования и абонентских станций) гораздо ниже, чем аналогичный стартовый показатель для других сетей протокола МРТ1327. Как уже было отмечено выше, применение транкинговой системы МРТ1327 оптимально при построении однозоновых и небольших многозоновых систем.

Перспектива перехода на цифровые технологии при построении систем связи практически не окажет влияние в ближайшие пять лет на сегмент небольших систем протокола МРТ1327, так как активно разрабатываемые сегодня и внедряемые в Западной Европе решения на базе протокола TETRA предназначены для организации систем национального масштаба, с большими зонами действия и большим количеством абонентов. Наиболее корректным экономическим параметром оценки стоимости таких систем является оценка затрат на покрытие единицы площади с определенной пропускной способностью. На сегодняшний день этот параметр для небольших систем с невысокой плотностью абонентов, реализованных на базе протокола МРТ1327 и TETRA, отличается в несколько раз. Необходимо учитывать, что зона действия одной базовой станции TETRA существенно меньше (в силу того, что используется временное разделение каналов), чем зона действия базовой станции МРТ1327, а затраты на построение качественных межзоновых соединений с требуемой пропускной способностью очень высоки. Это означает, что реальный переход на цифровые

технологии профессиональной мобильной связи в России начнется при формировании соответствующих экономических условий.

### **MPT1327 и SmarTrunk**

Ближайшим конкурентом небольших систем протокола MPT1327 является система SmarTrunk, исторически завоевавшая в России большую популярность. Реально, эта конкуренция является скорее формальной, так как ряд особенностей системы SmarTrunk не позволяют ей полноценно решать задачи технологической связи. Во-первых, система принципиально предназначена для осуществления индивидуальных вызовов и вызовов в ТФОП, а не для оперативной (групповой), технологической связи. Во-вторых, в многоканальных системах SmarTrunk время установления связи столь велико, в силу особенностей технологии, что не удовлетворяет профессионального потребителя. Существенным фактором, также влияющим на выбор потребителя, является цена. Разница между удельной стоимостью одного абонента в системе SmarTrunk и в транкинговой системе MPT1327 составляет около 15% при порядковой разнице в функциональных возможностях системы. Нужно учитывать, что корректное сравнение любых систем (в том числе SmarTrunk и MPT1327) возможно при условии использования аналогичных (по качеству) ретрансляторов, антенн и оборудования ВЧ-тракта.

Следует сказать, что и в России большинство крупных транкинговых сетей построено на базе оборудования стандарта MPT1327. Руководители компаний, занимающихся поставками оборудования и системной интеграцией в области профессиональной радиосвязи, отмечают, что большинство стоящих перед их заказчиками задач оперативной речевой связи достаточно эффективно решается с помощью аналоговых систем стандарта MPT1327.

### **Цифровые стандарты транкинговой радиосвязи**

Цифровые стандарты транкинговой радиосвязи пока не получили широкого распространения в России, но уже сейчас можно говорить об их активном и успешном внедрении.

Вместе с тем, круг пользователей цифровых транкинговых систем постоянно расширяется. В России также появляются крупные заказчики систем профессиональной радиосвязи, требования которых обуславливают переход к цифровым технологиям. В первую очередь, это крупные ведомства и корпорации, такие как РАО ЕЭС, Минтранс, МПС, Сибнефть и другие, а также силовые структуры и правоохранительные органы.

Необходимость перехода объясняется рядом преимуществ цифрового транкинга перед аналоговыми системами, такими как большая спектральная эффективность за счет применения сложных видов модуляции сигнала и низкоскоростных алгоритмов

речепреобразования, повышенная емкость систем связи, выравнивание качества речевого обмена по всей зоне обслуживания базовой станции за счет применения цифровых сигналов в сочетании с помехоустойчивым кодированием. Развитие мирового рынка систем транкинговой радиосвязи сегодня характеризуется широким внедрением цифровых технологий. Ведущие мировые производители оборудования транкинговых систем объявляют о переходе к цифровым стандартам радиосвязи, предусматривая при этом либо выпуск принципиально нового оборудования, либо адаптацию аналоговых систем к цифровой связи.

Цифровые транкинговые системы по сравнению с аналоговыми имеют ряд преимуществ за счет реализации требований по повышенной оперативности и безопасности связи, предоставления широких возможностей по передаче данных, более широкого спектра услуг связи (включая специфические услуги связи для реализации специальных требований служб общественной безопасности), возможностей организации взаимодействия абонентов различных сетей.

1. Высокая оперативность связи. Прежде всего, это требование означает минимально возможное время установления канала связи (время доступа) при различных видах соединений (индивидуальных, групповых, с абонентами телефонных сетей и пр.). В конвенциональных системах связи при передаче цифровой информации, требующей временной синхронизации передатчика и приемника, для установления канала связи требуется большее время, чем аналоговой системе. Однако для транкинговых систем радиосвязи, где информационный обмен, в основном, производится через базовые станции, цифровой режим сравним по времени доступа с аналоговым (и в аналоговых, и в цифровых системах радиосвязи, как правило, канал управления реализуется на основе цифровых сигналов).

Кроме этого, в системах цифровой транкинговой радиосвязи более просто реализуются различные режимы связи, повышающие ее оперативность, такие как режим непосредственной (прямой) связи между подвижными абонентами (без использования базовой станции), режим открытого канала (выделения и закрепления частотных ресурсов сети за определенной группой абонентов для ведения ими в дальнейшем переговоров без выполнения какой-либо установочной процедуры, в т. ч. без задержки), режимы аварийных и приоритетных вызовов и др.

Цифровые системы транкинговой радиосвязи лучше приспособлены к различным режимам передачи данных, что предоставляет, например, сотрудникам правоохранительных органов и служб общественной безопасности широкие возможности оперативного получения сведений из централизованных баз данных, передачи необходимой информации, включая изображения с мест происшествий,



организации централизованных диспетчерских систем местоопределения подвижных объектов на основе спутниковых радионавигационных систем. Данные системы позволяют потребителям нефтегазового комплекса использовать их как транспорт не только для передачи голосовой связи, но и для передачи телеметрии и телеуправления.

2. Передача данных. Цифровые системы транкинговой радиосвязи лучше приспособлены к различным режимам передачи данных, что предоставляет абонентам цифровых сетей широкие возможности оперативного получения сведений из централизованных баз данных, передачи необходимой информации, включая изображения, организации централизованных диспетчерских систем местоопределения подвижных объектов на основе спутниковых радионавигационных систем. Скорость передачи данных в цифровых системах значительно выше, чем в аналоговых.

В большинстве систем радиосвязи на основе цифровых стандартов реализуются услуги передачи коротких и статусных сообщений, персонального радиовызова, факсимильной связи, доступа к фиксированным сетям связи (в т. ч. работающим на основе протоколов TCP/IP).

3. Безопасность связи. Включает в себя требования по обеспечению секретности переговоров (исключение возможности извлечения информации из каналов связи ком-либо, кроме санкционированного получателя) и защиты от несанкционированного доступа к системе (исключение возможности захвата управления системой и попыток вывести ее из строя, защита от «двойников» и т. п.). Как правило, основными механизмами обеспечения безопасности связи является шифрование и аутентификация абонентов.

Естественно, что в системах цифровой радиосвязи по сравнению с аналоговыми системами гораздо легче обеспечить безопасность связи. Даже без принятия специальных мер по закрытию информации цифровые системы обеспечивают повышенный уровень защиты переговоров (аналоговые сканирующие приемники непригодны для прослушивания переговоров в системах цифровой радиосвязи). Кроме того, некоторые стандарты цифровой радиосвязи предусматривают возможность сквозного шифрования информации, что позволяет использовать оригинальные (т. е. разработанные самим пользователем) алгоритмы закрытия речи.

Цифровые системы транкинговой радиосвязи позволяют использовать разнообразные механизмы аутентификации абонентов: различные идентификационные ключи и SIM-карты, сложные алгоритмы аутентификации, использующие шифрование, и т. п.

4. Услуги связи. Цифровые транкинговые системы реализуют современный уровень сервисного обслуживания абонентов сетей связи, предоставляя возможности

автоматической регистрации абонентов, роуминга, управления потоком данных, различных режимов приоритетного вызова, переадресации вызова и т. д.

Наряду со стандартными функциями сетевого обслуживания по заявкам правоохранительных органов в стандарты цифровой транкинговой радиосвязи часто включают требования по наличию специфических услуг связи: режиму вызова, поступающему только с санкции диспетчера системы; режиму динамической модификации групп пользователей; режиму дистанционного включения радиостанций для акустического прослушивания обстановки и т. д.

5. Возможность взаимодействия. Цифровые системы радиосвязи, имеющие гибкую структуру адресации абонентов, предоставляют широкие возможности как для создания различных виртуальных сетей в рамках одной системы, так и для организации при необходимости взаимодействия абонентов различных сетей связи. Для служб общественной безопасности особенно актуальным является требование по обеспечению возможности взаимодействия подразделений различных ведомств для координации совместных действий при чрезвычайных ситуациях: стихийных бедствиях, террористических актах и т. п.

К наиболее популярным, заслужившим международное признание стандартам цифровой транкинговой радиосвязи, на основе которых во многих странах развернуты системы связи, относятся:

- EDACS, разработанный фирмой Ericsson;
- TETRA, разработанный Европейским институтом стандартов связи;
- APCO 25, разработанный Ассоциацией официальных представителей служб связи органов общественной безопасности;
- Tetrapol, разработанный фирмой Matra Communication (Франция);
- IDEN, разработанный фирмой Motorola (США).

Все эти стандарты отвечают современным требованиям к системам транкинговой радиосвязи. Они позволяют создавать различные конфигурации сетей связи: от простейших локальных однозоновых систем до сложных многозоновых систем регионального или национального уровня. Системы на основе данных стандартов обеспечивают различные режимы передачи речи (индивидуальная связь, групповая связь, широковещательный вызов и т. п.) и данных (коммутируемые пакеты, передача данных с коммутацией цепей, короткие сообщения и т. п.) и возможность организации связи с различными системами по стандартным интерфейсам (с цифровой сетью с интеграцией услуг, с телефонной сетью общего пользования, с учрежденческими АТС и т. д.).

## Система EDACS

Одним из первых стандартов цифровой транкинговой радиосвязи был стандарт EDACS (Enhanced Digital Access Communication System), разработанный фирмой Ericsson (Швеция). Первоначально он предусматривал только аналоговую передачу речи, однако позднее была разработана специальная цифровая модификация системы EDACS Aegis.

Система EDACS работает в соответствии с закрытым фирменным протоколом, отвечающим требованиям по безопасности пользования системами транкинговой радиосвязи, которые были разработаны рядом фирм-производителей оборудования подвижной связи совместно с правоохранительными органами.

Цифровые системы EDACS выпускались на диапазоны частот 138-174 МГц, 403-423, 450-470 МГц и 806-870 МГц с разносом частот 30; 25; и 12,5 кГц.

Представьте, что Вы пришли на обычный железнодорожный вокзал за билетами. Окинув взглядом очереди желающих уехать, Вы безошибочно выбираете нужную Вам кассу. Но Вы же не знаете, сколько времени кассир будет обслуживать каждого стоящего перед Вами... И другая ситуация: вы приходите в "Экспресс-кассы". Общий принцип такого обслуживания сводится к тому, что очередь здесь всего одна, и ожидающий обслуживается первой освободившейся кассой. И как раз эта схема описывает то, как обслуживаются заявки в транкинговой связи (рис. 3.29).

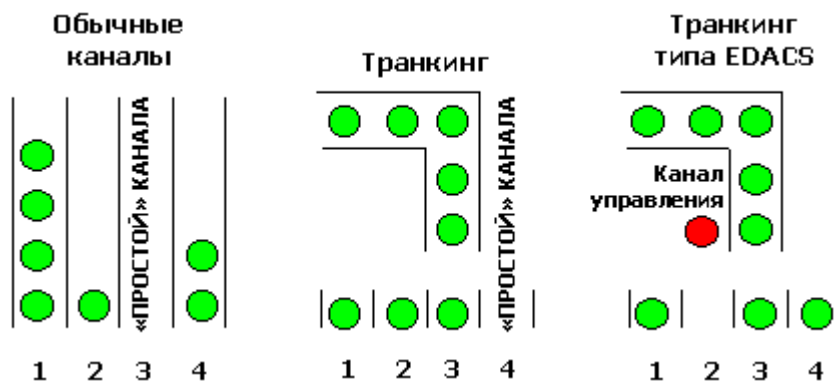


Рис.3.29. Организация очередей

Речевое кодирование в системе производится путем компрессии импульсно-кодовой последовательности со скоростью 64 Кбит/с, полученной с помощью аналого-цифрового преобразования сигнала с тактовой частотой 8 кГц и разрядностью 8 бит. Алгоритм компрессии, реализующий метод адаптивного многоуровневого кодирования (разработка фирмы Ericsson), обеспечивает динамическую адаптацию к индивидуальным характеристикам речи абонента и формирует низкоскоростную цифровую последовательность, которая подвергается помехоустойчивому

кодированию, доводящему скорость цифрового потока до 9,2 Кбит/с. Далее сформированная последовательность делится на пакеты, в каждый из которых включаются сигналы синхронизации и управления. Результирующая последовательность передается в канал связи со скоростью 9600 бит/с.

В системах EDACS применяется частотное разделение каналов связи с использованием высокоскоростного выделенного канала управления, который предназначается для обмена цифровой информацией между радиостанциями и устройствами управления работой системы. Это обеспечивает высокую оперативность связи в системе (время установления канала связи в однозоновой системе не превышает 0,25 с). Скорость передачи информации в рабочем канале как и в канале управления равна 9600 бит/с.

Основными функциями стандарта EDACS, обеспечивающими специфику служб общественной безопасности, являются различные режимы вызова (групповой, индивидуальный, экстренный, статусный), динамическое управление приоритетностью вызовов (в системе может использоваться до 8 уровней приоритета), динамическая модификация групп абонентов (перегруппировка), дистанционное выключение радиостанций (при утере или краже радиосредств).

Системы стандарта EDACS обеспечивают возможность работы радиосредств как в цифровом, так и в аналоговом режиме, что позволяет пользователям на определенном этапе использовать старый парк технических средств радиосвязи.

Одной из основных задач разработки системы было достижение высокой надежности и отказоустойчивости сетей связи на основе данного стандарта. Эта цель была достигнута, что подтверждается надежной и устойчивой работой систем связи в различных регионах мира. Высокая отказоустойчивость обеспечивается реализацией в аппаратуре системы EDACS распределенной архитектуры и заложенным принципом распределенной обработки данных. Базовая станция сети связи сохраняет работоспособность даже в случае отказа всех ретрансляторов, кроме одного. Последний работоспособный ретранслятор в этом случае в исходном состоянии работает как ретранслятор канала управления, при поступлении вызовов обрабатывает их, назначая свой собственный частотный канал, после чего переходит в режим ретранслятора рабочего канала. При выходе из строя контроллера базовой станции система переходит в аварийный режим, при котором теряются некоторые функции сети, однако сохраняется частичная работоспособность (ретрансляторы работают автономно).

В системе EDACS возможно сквозное шифрование информации, однако в связи с закрытым протоколом приходится применять либо стандартный алгоритм защиты, предлагаемый фирмой Ericsson, либо согласовывать с ней возможность использования

собственных программно-аппаратных модулей, реализующих оригинальные алгоритмы, которые должны быть совместимы с системным протоколом EDACS.

На сегодняшний день в мире развернуто большое количество сетей стандарта EDACS, в числе которых есть многозоновые сети связи, используемые службами общественной безопасности различных стран. В России функционирует около десяти сетей данного стандарта, наиболее крупной является сеть связи в г. Москве, включающая 9 базовых станций. Вместе с тем, в настоящее время фирма Ericsson не проводит работ по совершенствованию системы EDACS, прекратила поставки оборудования для развертывания новых сетей данного стандарта и только поддерживает функционирование действующих сетей.

### Система TETRA

TETRA представляет собой стандарт цифровой транкинговой радиосвязи, состоящий из ряда спецификаций, разработанных Европейским институтом телекоммуникационных стандартов ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Стандарт TETRA создавался как единый общеевропейский цифровой стандарт. Поэтому до апреля 1997 г. аббревиатура TETRA означала Трансевропейское транкинговое радио (Trans-European Trunked RAdio). Однако в связи с большим интересом, проявленным к стандарту в других регионах, территория его действия не ограничивается только Европой. В настоящее время TETRA расшифровывается как Наземное транкинговое радио (TErrestrial Trunked RAdio).

TETRA - открытый стандарт, т. е. предполагается, что оборудование различных производителей будет совместимо. Доступ к спецификациям TETRA свободен для всех заинтересованных сторон, вступивших в ассоциацию «Меморандум о взаимопонимании и содействии стандарту TETRA» (MoU TETRA). Ассоциация, в которую в конце 2001 г. входило более 80 участников, объединяет разработчиков, производителей, испытательные лаборатории и пользователей различных стран.

Стандарт TETRA состоит из двух частей: TETRA V+D (TETRA Voice+Data) - стандарта на интегрированную систему передачи речи и данных, и TETRA PDO (TETRA Packet Data Optimized) - стандарта, описывающего специальный вариант транкинговой системы, ориентированный только на передачу данных.

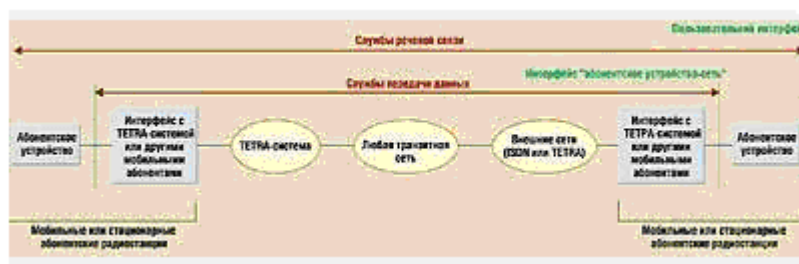


Рис. 3.30. Структура служб системы TETRA

В стандарт TETRA входят спецификации беспроводного интерфейса, интерфейсов между сетью TETRA и цифровой сетью с интеграцией услуг (ISDN), телефонной сетью общего пользования, сетью передачи данных, учрежденческими АТС и т. п. В стандарт включено описание всех основных и дополнительных услуг, предоставляемых сетями TETRA. Специфицированы также интерфейсы локального и внешнего централизованного управления сетью.

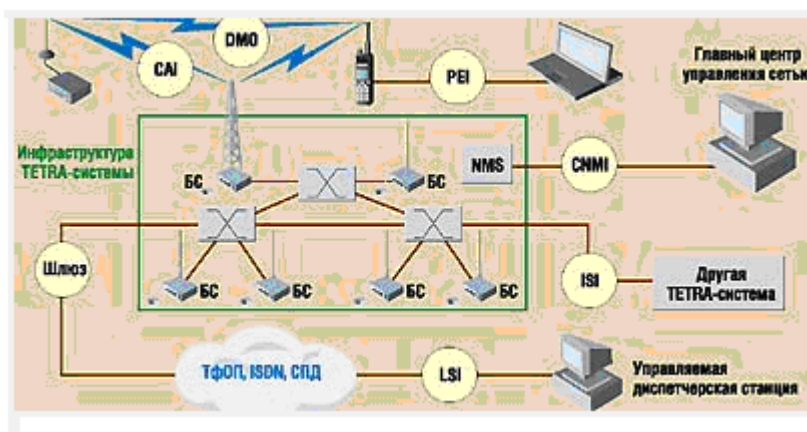


Рис. 3.31. Стандартные интерфейсы TETRA-систем

Радиоинтерфейс стандарта TETRA предполагает работу в стандартной сетке частот с шагом 25 кГц. Необходимый минимальный дуплексный разнос радиоканалов - 10 МГц. Для систем стандарта TETRA могут использоваться некоторые поддиапазоны частот. В странах Европы за службами безопасности закреплены диапазоны 380-385/390-395 МГц, а для коммерческих организаций предусмотрены диапазоны 410-430/450-470 МГц. В Азии для систем TETRA используется диапазон 806-870 МГц.

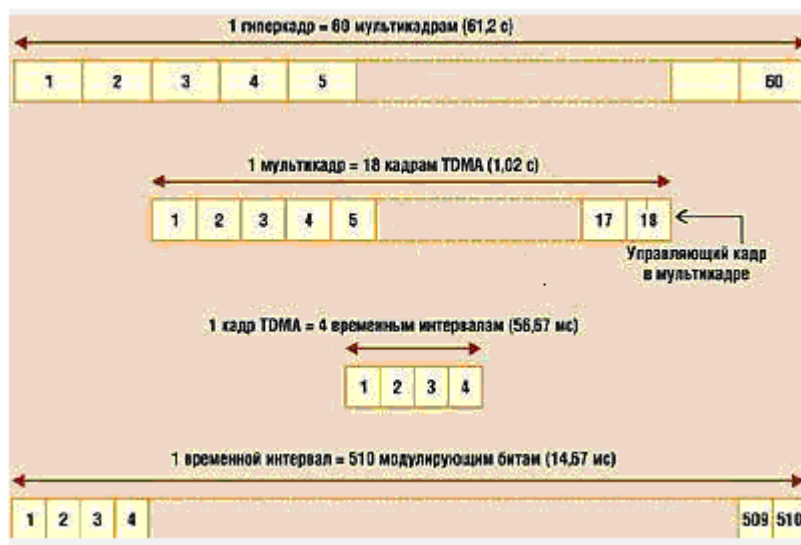


Рис. 3.32. Структура кадра TETRA

В системах стандарта TETRA V+D используется метод многостанционного доступа с временным разделением (МДВП) каналов связи. На одной физической частоте может быть организовано до 4 независимых информационных каналов.

Сообщения передаются мультикадрами длительностью 1,02 с. Мультикадр содержит 18 кадров, один из которых является контрольным. Кадр имеет длительность 56,67 мс и содержит 4 временных интервала (time slots). В каждом из временных интервалов передается информация своего временного канала. Временной интервал имеет длину 510 бит, из которых 432 являются информационными (2 блока по 216 бит).

Пропускная способность одного информационного канала составляет 7,2 Кбит/с, а скорость цифрового информационного потока данных - 28,8 Кбит/с. (При этом общая скорость передачи символов в радиоканале за счет дополнительной служебной информации и контрольного кадра в мультикадре соответствует скорости модуляции и равна 36 Кбит/с.)

Системы стандарта TETRA могут функционировать в следующих режимах:

- транкинговой связи;
- с открытым каналом;
- непосредственной связи.

В режиме транкинговой связи обслуживаемая территория покрывается зонами действия базовых приемопередающих станций. Стандарт TETRA позволяет как использовать в системах только распределенный канал управления, так и организовывать его сочетание с выделенным частотным каналом управления. При работе сети с распределенным каналом управления служебная информация передается либо только в контрольном кадре мультикадра (одном из 18), либо еще в специально выделенном временном канале (одном из 4-х каналов, организуемых на одной частоте). В дополнение к распределенному каналу связи может использоваться выделенный частотный канал управления, специально предназначенный для обмена служебной информацией (при этом реализуются максимальные услуги связи).

В режиме с открытым каналом группа пользователей имеет возможность устанавливать соединение «один пункт - несколько пунктов» без какой-либо установочной процедуры. Любой абонент, присоединившись к группе, может в любой момент использовать этот канал. В режиме с открытым каналом радиостанции работают в двухчастотном симплексе.

В режиме непосредственной (прямой) связи между терминалами устанавливаются двух- и многоточечные соединения по радиоканалам, не связанным с каналом управления сетью, без передачи сигналов через базовые приемопередающие станции.

Для увеличения зон обслуживания в стандарте TETRA предусматривается возможность использования абонентских радиостанций в качестве ретрансляторов.

TETRA предоставляет пользователям ряд услуг, которые включены в стандарт по заявке Ассоциации европейской полиции (Schengen Group), сотрудничающей с техническим комитетом ETSI:

- вызов, санкционированный диспетчером (режим, при котором вызовы поступают только с санкции диспетчера);
- приоритетный доступ (в случае перегруженности сети доступные ресурсы присваиваются в соответствии со схемой приоритетов);
- приоритетный вызов (присвоение вызовов в соответствии со схемой приоритетов);
- приоритетное прерывание обслуживания вызовов (прерывание обслуживания вызовов с низким приоритетом, если ресурсы системы исчерпаны);
- избирательное прослушивание (перехват поступающего вызова без влияния на работу других абонентов);
- дистанционное прослушивание (дистанционное включение абонентской радиостанции на передачу для прослушивания обстановки у абонента);
- динамическая перегруппировка (динамическое создание, модификация и удаление групп пользователей);
- идентификация вызывающей стороны.

Средства защиты радиоинтерфейса стандарта TETRA включают механизмы аутентификации абонента и инфраструктуры, обеспечения конфиденциальности трафика за счет потока псевдоимен и специфицированного шифрования информации. Определенная дополнительная защита информации обеспечивается возможностью переключения информационных каналов и каналов управления в процессе ведения сеанса связи.

Следует также отметить, что в стандарте TETRA в связи с использованием метода временного разделения каналов (МДВР) связи во всех абонентских терминалах имеется возможность организации связи в режиме полного дуплекса.

Сети TETRA развернуты в Европе, Северной и Южной Америке, Китае, Юго-Восточной Азии, Австралии, Африке.

В настоящее время завершается разработка второй стадии стандарта (TETRA Release 2 (R2)), направленной на интеграцию с мобильными сетями 3-го поколения, кардинальное увеличение скорости передачи данных, переход от специализированных



SIM-карт к универсальным, дальнейшее увеличение эффективности сетей связи и расширение возможных зон обслуживания.

В России оборудование TETRA предлагается рядом компаний – системных интеграторов. Реализовано несколько пилотных проектов сетей TETRA. Под эгидой Минсвязи проводится разработка системного проекта «Федеральная сеть подвижной радиосвязи TETRA», получившего название «Тетрарус». В 2001 г. был создан Российский TETRA Форум, в задачи которого входят продвижение технологии TETRA в России, организация обмена информацией, содействие развитию национального производства, участие в работе по гармонизации радиочастотного спектра и т. д. В соответствии с решением ГКЭС от 02.07.2003 г. использование стандарта TETRA признано перспективным «...в целях обеспечения связью органов государственного управления всех уровней, обороны, безопасности, охраны правопорядка, потребностей ведомств и крупных корпораций».

#### Система APCO 25

Стандарт APCO 25 разработан Ассоциацией официальных представителей служб связи органов общественной безопасности (Association of Public safety Communications Officials-international – **APCO**), которая объединяет пользователей систем связи, работающих в службах общественной безопасности. APCO является международной организацией и объединяет представителей правоохранительных органов около 70 стран. Штаб-квартира APCO находится в городе Южная Дейтона (штат Флорида, США), кроме этого, эта организация имеет представительства в Канаде, Карибском регионе и в Австралии.

Первые спецификации стандартов транкинговой радиосвязи, на основе которых были созданы системы EDACS (Ericsson), SmartNet (Motorola), LTR (E.F.Johnson), были разработаны APCO еще в конце 70-х годов. Однако эти спецификации не позволяли обеспечить совместимость и возможность взаимодействия различных систем, что послужило причиной начала нового проекта по разработке стандарта цифровой транкинговой радиосвязи, получившего название APCO 25.

Работы по созданию стандарта были начаты в конце 1989 г., а последние документы по установлению стандарта были утверждены и подписаны в августе 1995 г. на международной конференции и выставке APCO в Детройте. В настоящее время стандарт включает все основные документы, определяющие принципы построения радиоинтерфейса и других системных интерфейсов, протоколы шифрования, методы речевого кодирования и т.д.

В 1996 г. было принято решение о разделении всех спецификаций стандарта на два этапа реализации, которые были обозначены как Фаза I и Фаза II. В середине 1998 г.

были сформулированы функциональные и технические требования к каждой из фаз стандарта, подчеркивающие новые возможности Фазы II и ее отличия от Фазы I.

Основополагающими принципами разработки стандарта APCO 25, сформулированными его разработчиками, были требования:

- по обеспечению плавного перехода к средствам цифровой радиосвязи (т.е. возможности совместной работы на начальном этапе базовых станций стандарта с абонентскими аналоговыми радиостанциями, используемыми в настоящее время);
- по созданию открытой системной архитектуры для стимулирования конкуренции среди производителей оборудования;
- по обеспечению возможности взаимодействия различных подразделений служб общественной безопасности при проведении совместных мероприятий.

Если стандарты TETRA и TetraPol не поддерживают работу в своих системах аналоговых станций, то стандарт APCO 25 специально ориентирован на совместную работу цифровых и аналоговых радиосредств. При этом разработчики стандарта декларируют, что системы на основе APCO 25 позволяют, с одной стороны, жестко разграничить используемые частотные ресурсы (на аналоговые и цифровые), а с другой стороны – допускают и гибкое конфигурирование каналов, т.е. совместное использование общего частотного ресурса цифровыми и аналоговыми абонентскими станциями.

В том случае, если указанная возможность действительно удобно реализуется на практике (причем не только для систем производства компании Motorola), то она обеспечит серьезное преимущество APCO 25 перед другими стандартами, т.к. позволит производить плавный переход к цифровой радиосвязи путем поэтапного переоснащения подразделений служб общественной безопасности цифровыми радиостанциями. В особенности это актуально для России, где правоохранительные органы и службы общественной безопасности пока еще используют достаточно большой парк устаревших аналоговых радиосредств.

Системная архитектура стандарта поддерживает как транкинговые, так и обычные (конвенциональные) системы радиосвязи, в которых абоненты взаимодействуют между собой либо в режиме непосредственной связи, либо через ретранслятор. Основным функциональным блоком системы стандарта APCO 25 является радиоподсистема, определяемая как сеть связи, которая строится на основе одной или нескольких базовых станций. При этом каждая базовая станция должна поддерживать Общий радиointерфейс (CAI - Common Radio Interface) и другие стандартизованные

интерфейсы (межсистемный, с ТФОП, с портом передачи данных, с сетью передачи данных и сетевым управлением). При транкинговой системе используется выделенный канал управления.

Сильной стороной стандарта APCO 25 является то, что он предусматривает возможность работы в любом из стандартных диапазонов частот используемых системами подвижной радиосвязи: 138 – 174, 406 – 512 или 746 – 869 МГц.

Основной метод доступа к каналам связи – частотный (МДЧР), вместе с тем по заявке фирмы Ericsson в Фазу II включена возможность использования в системах стандарта APCO 25 множественного доступа с временным разделением каналов (МДВР).

В Фазе I стандартный шаг сетки частот составляет 12,5 кГц, для Фазы II - 6,25 кГц. При этом при полосе 12,5 кГц осуществляется четырехпозиционная частотная модуляция по методу C4FM со скоростью 4800 символов в секунду, а при полосе 6,25 кГц – четырехпозиционная фазовая модуляция со сглаживанием фазы по методу CQPSK. Сочетание указанных методов модуляции позволяет использовать на разных Фазах одинаковые приемники, дополняемые различными усилителями мощности (для Фазы I - простые усилители с высоким КПД, для Фазы II - усилители с высокой линейностью и ограниченной шириной излучаемого спектра). При этом демодулятор может осуществлять обработку сигналов по любому из методов.

Для речевого кодирования в стандарте используется кодек IMBE (Improved MultiBand Excitation), который применяется также в системе спутниковой связи Inmarsat. Скорость кодирования – 4400 бит/с. После помехоустойчивого кодирования речевой информации скорость информационного потока увеличивается до 7200 бит/с, а после формирования речевых кадров путем добавления служебной информации – до 9600 бит/с.

Речевая информация в радиоканале передается кадрами по 180 мс, которые носят название логических блоков данных (LDU – Logical Data Unit). Группа из 2 кадров образует суперкадр длительностью 360 мс. Любая передача речевой информации предваряется преамбулой, имеющей продолжительность 82,5 мс, а заканчивается маркером конца сообщения (сигналом отбоя). Структура речевого сообщения показана на рис.2.13.

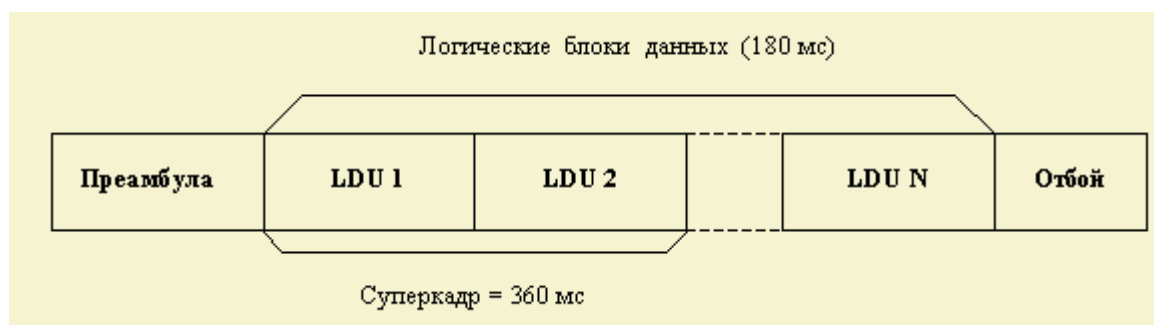


Рис. 3.33. Структура речевого сообщения в стандарте APCO 25

Речевая преамбула предназначена для начальной синхронизации передающей и приемной радиостанции, инициализации всех функций шифрования и передачи адресной информации. Основу преамбулы составляет кодовое слово заголовка, в которое входят:

- индикатор сообщения (MI – Message Indicator), характеризующий начальные условия для алгоритма шифрования (72 бита);
- идентификатор изготовителя (8 бит);
- идентификатор типа используемого алгоритма шифрования (8 бит);
- идентификатор ключа шифрования (16 бит);
- идентификатор разговорной группы (16 бит).

Кодовое слово длиной 120 бит подвергается помехоустойчивому кодированию с помощью кодов Рида-Соломона и Голея, в результате чего его размерность увеличивается до 648 бит.

После этого, в начало преамбулы помещается:

- начальный синхропакет (FS – Frame Synchronization) длиной 48 бит;
- идентификатор сети (NID – Network Identifier), передаваемый для предотвращения конфликтов между радиостанциями различных сетей, работающими на одной частоте (64 бита), а в конец – 10 нулевых бит.

Окончательное формирование структуры преамбулы производится путем вставки 2 бит статусной информации после каждых 70 бит пакета данных преамбулы (770 бит), получившегося после добавления синхропакета, идентификатора сети и нулевых бит (всего добавляется 22 статусных бита). Окончательная длина преамбулы составляет 792 бита, так что при скорости информации в канале 9600 бит/с передача преамбулы производится в течение 82,5 мс.

Каждый логический блок данных состоит из 9 речевых фреймов длиной 144 бита, образованных 88 информационными битами, полученными преобразованием с помощью кодека IMBE 20 мс отрезка речевого сигнала, и 56 битами корректирующего кода контроля четности. Кроме этого, в состав LDU входят дополнительные служебные сообщения. В первом логическом блоке суперкадра передается информация управления связью (LC – Link Control), состоящая 72 битов информации и 168 бит корректирующего кода) и информация низкоскоростного канала сигнализации (LSD – Low Speed Data), включающая 16 бит данных и 16 бит корректирующего кода. Второй логический блок суперкадра также содержит информацию низкоскоростного канала сигнализации LSD, и кроме этого, информацию алгоритма шифрования (ES – Encryption Sync), включающую 96 информационных бит и 144 бит корректирующего кода. Структура суперкадра речевой информации показана на рис.3.34.



Рис. 3.34. Структура речевого суперкадра в стандарте APCO 25

Информация управления каналом связи включает индикатор сообщения, идентификатор производителя, признак экстренного вызова, резервное поле, идентификаторы разговорной группы (для индивидуального вызова – вызываемого абонента) и передающего абонента. Встроенные в общий информационный поток кадры управления каналом связи позволяют повысить надежность связи за счет возможности восстановления соединения после кратковременного разрушения канала связи.

Информация алгоритма шифрования содержит индикатор сообщения, идентификатор типа используемого алгоритма шифрования и идентификатор ключа шифрования.

Канал низкоскоростной сигнализации может быть использован для различных применений, в частности для передачи сигналов местоположения подвижных объектов.

Заложенная в стандарте APCO 25 система идентификации абонентов позволяет адресовать в одной сети не менее 2 миллионов радиостанций и до 65 тысяч групп. При этом задержка при установлении канала связи в подсистеме, в соответствии с функциональными и техническими требованиями к стандарту APCO 25, не должна превышать 500 мс (в режиме прямой связи – 250 мс, при связи через ретранслятор 0 350 мс).

В системах стандарта APCO 25 предусмотрены 2 варианта *передачи данных*: с подтверждением приема и без подтверждения. При передаче данных для исправления ошибок используется избыточное решетчатое кодирование и межблочное перемежение.

Исходные массивы данных разбиваются на фрагменты длиной не более 512 байт. При передаче с подтверждением приема фрагменты делят на блоки по 16 байт, при этом каждый блок имеет свой номер для возможности повтора. При передаче без подтверждения приема блоки, на которые разбиваются фрагменты массивов данных, содержат 12 байт.

Передача каждого пакета данных начинается с преамбулы, содержащей синхропакет, номер фрагмента, количество блоков в пакете, а также идентификаторы сети, производителя, точки доступа и логический идентификатор связи.

Данные передаются по тем же каналам, что и речевые сообщения, и с той же скоростью 9600 бит/с. Радиосистемы стандарта APCO 25 обеспечивают связь с сетями фиксированной связи с протоколами X.25, SNA, TCP/IP. Следует отметить, что протокол IP поддерживается как специальная IP-служба, которая с помощью специального сетевого шлюза обеспечивает возможность связи мобильных терминалов и проводной инфраструктуры с приложениями, использующими IP.

Разработчики стандарта при рассмотрении модели гипотетического противника выделили следующие угрозы безопасности связи: перехват сообщений, повтор сообщений с задержкой и с искажением информации, создание преднамеренной помехи, анализ трафика абонентов, создание дубликатов абонентов, внедрение противника в качестве легитимного пользователя системы. Противодействие большинству этих угроз в стандарте APCO 25 обеспечивается с помощью 3-х основных механизмов:

- **конфиденциальности** связи, т.е. защиты информации от любых видов несанкционированного доступа;
- **аутентификации** абонентов и сообщений;
- **системы управления ключевой информацией**.

В основе всех указанных механизмов обеспечения безопасности связи лежит криптографическое шифрование информации. Системы APCO 25, в соответствии с функциональными и техническими требованиями, должны быть рассчитаны на обеспечение, как минимум, двух из 4-х уровней криптозащиты в зависимости от типа системы связи:

Тип 1 – связь с гарантированным засекречиванием информации на уровне национального правительства;

Тип 2 – несекретная связь национального уровня, требующая защиты коммуникаций;

Тип 3 – несекретная правительственная связь, требующая ограничений по доступу;

Тип 4 – для коммерческих и других применений (включая экспортируемые модификации систем).

Общая модель криптопреобразования (шифрования/дешифрования) информации в системе связи представлена на рис.2.15.

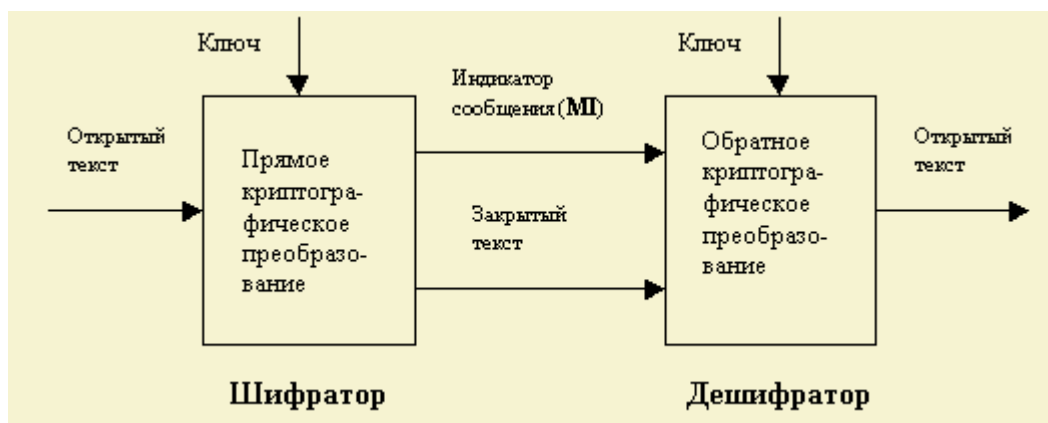


Рис. 3.35. Модель криптопреобразования информации в стандарте APCO 25

На передающей стороне открытый текст сообщения поступает на шифратор, где на основе ключа и определенного криптографического алгоритма преобразуется в зашифрованный текст той же длины, после чего передается по радиоканалу. Вместе с зашифрованным текстом передается индикатор сообщения MI, который предназначен для синхронизации работы шифратора и дешифратора. На приемной стороне после выполнения процедуры синхронизации с помощью аналогичных криптоалгоритмов и криптографического ключа зашифрованный текст преобразуется в открытый.

В различных режимах используются различные модификации общей модели криптозащиты информации, показанные на рис.2.36.:

- а) ECB – Electronic Code Book;
- б) OFB – Output Feed Back;
- в) CFB – Cipher Feed Back.

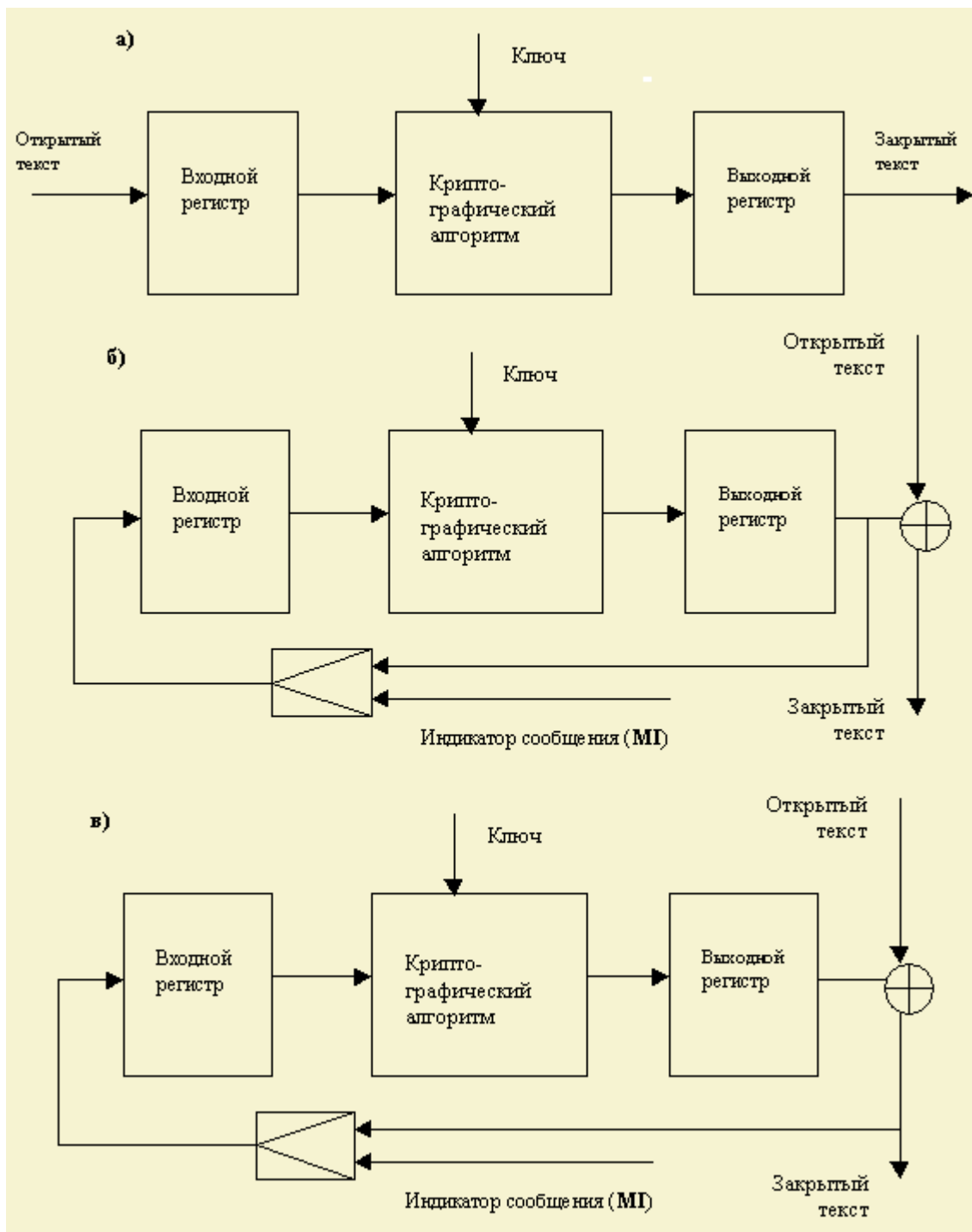


Рис. 3.36. Разновидности криптографических преобразований информации

*Конфиденциальность связи* достигается шифрованием трафика речи и данных, которое осуществляется по методу OFB (рис. 3.36б).

*Аутентификация*, предназначенная для удостоверения подлинности сообщений и абонентов, а также обеспечения секретности абонентов (т.е. защиты сведений о том,



кому адресовано и от кого исходит передаваемое сообщение), осуществляется путем передачи номеров сообщений, которые подвергаются шифрации по варианту OFB (рис. 3.36б) и добавления к сообщению специального аутентификационного кода (MAC – Message Authentication Code), который генерируется по варианту CFB (рис. 3.36в). Код номера сообщения и его идентификационный код носят временный характер и изменяются от сообщения к сообщению.

*Система управления ключевой информацией* предназначена для генерации, хранения, ввода, распределения, архивирования и удаления криптографических ключей. Ввод ключей в абонентское оборудование производится с помощью специальной аппаратуры KMF (Key Management Facility). Кроме этого, в системах стандарта APCO 25 стандартизован специальный режим распространения ключей по радиоканалу OTAR (Over-the-air-rekeying). Информация о ключах, пересылаемых по радиоканалу защищается по варианту ECB.

Несмотря на то, что APCO является международной организацией, представительства которой находятся в ряде регионов, основную роль в продвижении этого стандарта играют американские фирмы, поддерживаемые правительством США. К числу участников общественного сектора Ассоциации относятся ФБР, Министерство обороны США, Федеральный комитет связи, полиции ряда штатов США, Секретная служба и многие другие государственные организации. В качестве производителей оборудования стандарта APCO 25 уже заявили себя такие ведущие фирмы, как Motorola (основной разработчик стандарта), E.F.Johnson, Transcrypt, Stanlite Electronics и др. Фирма Motorola уже представила свою первую систему, основанную на стандарте APCO 25, имеющую название ASTRO.

В составе сетей радиосвязи ASTRO может использоваться широкий набор абонентского оборудования, удовлетворяющего запросам различных пользователей.

Первые полнофункциональные цифровые портативные радиостанции, выпущенные компанией Motorola, получили название *ASTRO Saber*. Они могут работать как в цифровом, так и в аналоговом режиме в конвенциональных и транкинговых сетях радиосвязи в любом из диапазонов частот, выделенных для систем сухопутной подвижной связи (138-174, 406-512, 746-869 МГц). Шаг сетки частот может иметь значения – 12,5; 25 и 30 кГц. Выпускаются различные модификации станций, отличающиеся друг от друга числом рабочих каналов, вариантами реализации органов управления и индикации, а также некоторыми функциональными возможностями.

Новейшая разработка компании Motorola – *семейство портативных радиостанций XTS 3000*. Эти радиостанции поддерживают тот же набор функций, что ASTRO Saber, но выполнены в другом конструктиве и имеют меньшие габариты и вес.

Благодаря унификации конструктивных решений с серией станций MTS 2000, работающих в системе SmartNet, станции XTS 3000 могут использовать те же аксессуары: головные телефоны, гарнитуру скрытного ношения, выносные микрофон и динамик, зарядное устройство, антенны.

**Мобильные радиостанции ASTRO Spectra** выпускаются в двух модификациях: для автомашин и мотоциклов. Motorola предлагает пять вариантов исполнения станций, отличающихся некоторыми функциональными возможностями, числом рабочих каналов и размерами индикационного табло.

В качестве стационарной радиостанции в системе используется станция **ASTRO CONSOLETTE**. Кроме поддержки протокола стандарта APCO 25, стационарная радиостанция может работать с аналоговыми системами сигнализации MDC-1200 и PL/PDL. Станция ASTRO CONSOLETTE имеет два варианта исполнения: для местного и дистанционного управления по телефонной линии.

Для организации передачи данных компания Motorola выпускает **беспроводной портативный терминал передачи данных FORTE**. Он представляет карманный персональный компьютер с сенсорным дисплеем и пером, оснащенный средствами для поддержания радиосвязи.

Пока в России системы стандарта APCO 25 не развернуты, однако специалисты проявляют большой интерес к данному стандарту, привлекательность которого заключается в его преемственности по отношению к существующим аналоговым системам радиосвязи, большом количестве производителей оборудования и возможности построения сетей связи во всех стандартных диапазонах частот. Активную политику продвижения систем данного стандарта в России проводят представительства фирм Motorola и ADI Limited (Австралия).

### **Система Tetrapol**

Работы по созданию стандарта цифровой транкинговой радиосвязи Tetrapol были начаты в 1987 г., когда фирма Matra Communications заключила контракт с французской жандармерией на разработку и ввод в эксплуатацию сети цифровой радиосвязи Rubis. Сеть связи была введена в эксплуатацию в 1994 г. По данным фирмы Matra на сегодняшний день сеть французской жандармерии охватывает более половины территории Франции и обслуживает более 15 тыс. абонентов. В том же 1994 г. фирма Matra создала свой форум Tetrapol, под эгидой которого были разработаны спецификации Tetrapol PAS (Publicly Available Specifications), определяющие стандарт цифровой транкинговой радиосвязи.

Стандарт Tetrapol описывает цифровую транкинговую систему радиосвязи с выделенным каналом управления и частотным методом разделения каналов связи.

Стандарт позволяет создавать как однозоновые, так и многозоновые сети связи различной конфигурации, обеспечивая также возможность прямой связи между подвижными абонентами без использования инфраструктуры сети и ретрансляции сигналов на фиксированных каналах.

Системы связи стандарта Tetrapol имеют возможность работы в диапазоне частот от 70 до 520 МГц, который в соответствии со стандартом определяется как совокупность двух поддиапазонов: ниже 150 МГц (VHF) и выше 150 МГц (UHF). Большая часть радиоинтерфейсов для систем этих поддиапазонов является общей, различие заключается в использовании различных методов помехоустойчивого кодирования и кодового перемежения. В поддиапазоне UHF рекомендуемый дуплексный разнос каналов приема и передачи составляет 10 МГц.

Частотный разнос между соседними каналами связи может составлять 12,5 или 10 кГц. В дальнейшем предполагается переход к разносу между каналами в 6,25 кГц. В системах стандарта Tetrapol поддерживается ширина полосы до 5 МГц, что обеспечивает возможность использования в сети 400 (при разносе 12,5 кГц) или 500 (при разносе 10 кГц) радиоканалов. При этом в каждой зоне может использоваться от 1 до 24 каналов.

В стандарте определяются три основных режима связи: транкинговый, режим прямой связи и режим ретрансляции.

В сетевом режиме (или режиме транкинговой связи) взаимодействие абонентов осуществляется с помощью базовых станций (БС), которые распределяют каналы связи между абонентами. При этом сигналы управления передаются на отдельном, специально выделенном для каждой БС частотном канале. В режиме прямой связи обмен информацией между подвижными абонентами производится напрямую без участия базовой станции. В режиме ретрансляции связь между абонентами осуществляется через ретранслятор, который имеет фиксированные каналы передачи и приема информации.

В системах стандарта Tetrapol поддерживается 2 основных вида информационного обмена: передача речи и передача данных.

Службы речевой связи позволяют осуществлять следующие виды вызовов: широковещательный вызов, вызов установки открытого канала, групповой вызов, индивидуальный вызов, множественный вызов с использованием списка абонентов, аварийный вызов.

Службы передачи данных предоставляют ряд услуг прикладного уровня, поддерживаемых заложенными в радиотерминалах функциями, таких как межабонентский обмен сообщениями в соответствии с протоколом X.400, доступ к

централизованным базам данных, доступ к фиксированным сетям в соответствии с протоколом TCP/IP, передача факсимильных сообщений, пересылка файлов, передача сигналов персонального вызова, передача коротких сообщений, передача статусных вызовов, поддержка режима передачи получаемых с помощью приемников GPS данных о местоположении объекта, передача видеоизображений.

В стандарте TetraPOL предусмотрены стандартные сетевые процедуры, обеспечивающие современный уровень обслуживания абонентов: динамическая перегруппировка, аутентификация абонента, роуминг, приоритетный вызов, управление передатчиком абонента, управление «профилем» абонента (дистанционное изменение параметров абонентского радиотерминала, заложенных в него при программировании) и др.

В связи с тем, что с самого начала стандарт TetraPOL был ориентирован на обеспечение требований правоохранительных органов, в нем предусмотрены различные механизмы обеспечения безопасности связи, направленные на предотвращение таких угроз, как несанкционированный доступ в систему, прослушивание ведущихся переговоров, создание преднамеренных помех, анализ трафика конкретных абонентов и т. п. К числу таких механизмов относятся:

- автоматическая реконфигурация сети (периодическое перераспределение ресурсов сети связи (изменение конфигурации) за счет установки и отмены открытых каналов, динамической перегруппировки, переназначения каналов связи диспетчером сети и т. п.);
- управление доступом в систему (контроль доступа к оборудованию сети связи посредством смарт-карт и системы паролей);
- сквозное шифрование информации (обеспечение возможности защиты передаваемой информации в любой точке линии связи между абонентами);
- аутентификация абонентов (автоматическое или проводимое по запросу диспетчера сети удостоверение подлинности абонентов);
- использование временных идентификаторов абонентов (замена уникальных идентификационных номеров абонентов на псевдонимы, сменяемые при каждом новом сеансе связи);
- имитация активности радиоабонентов (режим поддержки постоянного трафика при перерыве в ведении переговоров путем посылки БС по каналам связи сигналов, которые трудно отличить от информационных);
- дистанционное отключение радиотерминала (возможность отключения абонентского радиотерминала диспетчером сети);

- распространение ключей по радиоканалу (возможность передачи диспетчером сети секретных ключей абонентам по радиоканалу).

Системы стандарта Tetrapol широко используются во Франции. Видимо, не без поддержки правительством отечественного производителя, кроме сети связи Rubis национальной жандармерии, системы Tetrapol эксплуатируются французской полицией (система Asgorole) и службой железных дорог (система Iris).

Стандарт Tetrapol пользуется популярностью и в некоторых других странах Европы. На основе данного стандарта развернуты сети связи полиции Мадрида и Каталонии, подразделений безопасности Чешской Республики, службы аэропорта во Франкфурте. Специальная сеть связи Matrasom 9600 разворачивается в интересах Берлинского транспортного предприятия. Радиостанции сети связи будут установлены на более чем 2000 автобусах предприятия. Кроме радиосвязи, в сети задействуется функция определения местоположения транспортных средств.

В 1997 г. фирма Matra Communications выиграла тендер по созданию системы цифровой радиосвязи для королевской тайландской полиции. Контракт является частью заказа по модернизации полицейской радиосети, которая объединит 70 полицейских участков. Предполагается использование самых современных возможностей системы, включая доступ к централизованной базе данных, электронную почту, сквозное шифрование информации, местоопределение. Имеются также сведения о развертывании нескольких систем в двух других странах юго-восточной Азии, а также в интересах полиции Мехико.

В нашей стране системы стандарта Tetrapol пока не используются. В настоящее время ФАПСИ предполагает развертывание в России опытного района транкинговой радиосвязи данного стандарта.

#### Система IDEN

Технология IDEN (Integrated Digital Enhanced Network) была разработана компанией Motorola в начале 90-х годов. Первая коммерческая система на базе этой технологии была развернута в США компанией NEXTEL в 1994 г.

С точки зрения статуса стандарта IDEN можно охарактеризовать как корпоративный стандарт с открытой архитектурой. Это означает, что компания Motorola, сохраняя за собой все права по модификации системного протокола, предоставляет вместе с тем лицензии на производство компонентов системы различным производителям.

Данный стандарт разрабатывался для реализации интегрированных систем, обеспечивающих все виды подвижной радиосвязи: диспетчерской связи, мобильной телефонной связи, передачи текстовых сообщений и пакетов данных. Технология IDEN

ориентирована на создание корпоративных сетей крупных организаций или коммерческих систем, предоставляющих услуги как организациям, так и частным лицам.

При реализации диспетчерских сетей подвижной радиосвязи IDEN предоставляет возможности группового и индивидуального вызова, а также режима сигнализации вызова, при котором в случае недоступности абонента вызов запоминается в системе, а затем передается абоненту, когда тот становится доступным. Число возможных групп в IDEN составляет 65535. Время установления связи при групповом вызове в полудуплексном режиме не превышает 0,5 с.

Системы IDEN предоставляют возможности организации телефонной связи по любым направлениям: мобильный абонент – мобильный абонент, мобильный абонент – абонент ТФОП. Телефонная связь полностью дуплексная.

Абоненты систем IDEN имеют возможность передавать и получать на свои терминалы текстовые сообщения, а также передавать данные (в коммутационном режиме со скоростью 9,6 Кбит/с, а в пакетном – до 32 Кбит/с), что обеспечивает возможность организации факсимильной связи и электронной почты, а также взаимодействия с фиксированными сетями, в частности с Internet. Пакетный режим передачи данных поддерживает протокол TCP/IP.

Система IDEN выполнена на базе технологии МДВР. В каждом частотном канале шириной 25 кГц передается 6 речевых каналов. Это достигается путем разбиения кадра длительностью 90 мс на временные интервалы по 15 мс, в каждом из которых передается информация своего канала.

В стандарте используется стандартный для Америки и Азии частотный диапазон 805-821/855-866 МГц. IDEN имеет самую высокую спектральную эффективность среди рассматриваемых стандартов цифровой транкинговой связи, он позволяет разместить в 1 МГц до 240 информационных каналов. Вместе с тем, размеры зон покрытия базовых станций (ячеек) в системах IDEN меньше, чем в системах других стандартов, что объясняется малой мощностью абонентских терминалов (0,6 Вт – для портативных станций и 3 Вт – для мобильных).

Первая коммерческая система, развернутая в 1994 г. компанией NEXTEL, в настоящее время является общенациональной и насчитывает около 5500 сайтов и 2,7 млн. абонентов. В США имеется другая сеть, оператором которой является компания Southern Co. Сети IDEN развернуты также в Канаде, Бразилии, Мексике, Колумбии, Аргентине, Японии, Сингапуре, Китае, Израиле и других странах. Общее число абонентов IDEN в мире на сегодня превышает 3 млн. человек.

В России системы IDEN не развернуты и нет сведений о разработках проектов сетей данного стандарта.

### Сравнительный анализ стандартов цифровой радиосвязи

Обобщенные сведения о системах стандартов EDACS, TETRA, APCO 25, Tetrapol, iDEN и их технические характеристики представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.7. Услуги связи, предоставляемые представителям служб общественной безопасности

№	Специальные услуги связи	EDACS	TETRA	APCO	Tetrapol
		S	A	25	ol
1	Приоритет доступа	+	+	+	+
2	Система приоритетных вызовов	+	+	+	+
3	Динамическая перегруппировка	+	+	+	+
4	Избирательное прослушивание	+	+	+	+
5	Дистанционное прослушивание	-	+	н/с	+
6	Идентификация вызывающей стороны	+	+	+	+
7	Вызов, санкционированный диспетчером	+	+	+	+
8	Передача ключей по радиоканалу (OTAR)	-	+	+	+
9	Дистанционное отключение абонента	н/с	+	+	+
10	Аутентификация абонентов	н/с	+	+	+

### Ресурсы радиочастотного спектра

Наличие ресурсов радиочастотного спектра для развертывания системы радиосвязи является важнейшим критерием выбора той или иной системы. В данном случае наиболее перспективны стандарты, которые обеспечивают возможность построения сетей связи в наиболее широком диапазоне.

Системы EDACS реализуются в диапазонах 138-174, 403-423, 450-470 и 806-870 МГц, причем есть сведения о действующих сетях радиосвязи во всех диапазонах.

Системы TETRA предполагают использование следующих диапазонов: 380-385/390-395, 410-430/450-470 МГц и 806-870 МГц.

Системы APCO25 в соответствии с функциональными и техническими требованиями обеспечивают возможность работы в любом из диапазонов, отведенных для подвижной радиосвязи.

Стандарт Tetrapol ограничивает верхнюю частоту своих систем на уровне 520 МГц.

Системы стандарта iDEN функционируют только в диапазоне 800 МГц, что ограничивает их использование для построения определенного круга систем.

Следует отметить, что выделение ресурсов радиочастотного спектра для построения систем цифровой транкинговой радиосвязи наиболее реально в диапазоне 400 МГц.

При выборе стандарта радиосвязи обязательно необходимо учитывать информацию о том, является ли стандарт открытым или корпоративным (закрытым).

Корпоративные стандарты (EDACS и Tetrapol) являются собственностью их разработчиков. Приобретение оборудования возможно только у ограниченного круга производителей.

Открытые стандарты, к которым относятся TETRA и APCO25, обеспечивают создание конкурентной среды, привлечение большого количества производителей базового оборудования, абонентских радиостанций, тестовой аппаратуры для выпуска совместимых радиосредств, что способствует снижению их стоимости. Доступ к спецификациям стандартов предоставляется любым организациям и фирмам, вступившим в соответствующую ассоциацию. Пользователи, выбирающие открытый стандарт радиосвязи, не попадают в зависимость от единственного производителя и могут менять поставщиков оборудования. Открытые стандарты пользуются поддержкой со стороны государственных и правоохранительных структур, крупных компаний многих стран мира, а также поддерживаются ведущими мировыми производителями элементной и узловой базы.

Под дальностью связи обычно понимают максимальное расстояние между двумя радиостанциями, на котором обеспечивается устойчивая связь с требуемым качеством. При этом устойчивой связью считается тогда, когда отношение проведенных сеансов связи к общему числу попыток выхода на связь превышает заданное. Под требуемым качеством понимают качество приема речевого сигнала, при котором сохраняется заданная разборчивость.

Дальность связи зависит от большого количества факторов, которые можно разделить на 3 основные группы:



- факторы, определяемые условиями применения средств связи (высота установки антенн, рельеф местности, помеховая обстановка и т.д.);
- факторы, определяемые техническими параметрами, реализованными в аппаратуре связи (мощность передатчиков, чувствительность приемного тракта, коэффициент усиления антенны и т.д.);
- факторы, определяемые непосредственно заложенными в стандарте принципами построения каналов связи (ширина полосы канала связи, скорость информации в канале, способ модуляции сигнала, алгоритм речевого кодирования, методы помехоустойчивого кодирования).

Естественно, что корректно сравнивать стандарты цифровой транкинговой радиосвязи можно только по последней группе факторов, т.к. другие группы зависят или от условий эксплуатации, или определяются качеством производства радиосредств.

Следует понимать, что принципиально системы с FDMA (МДЧР) обеспечивают большую дальность связи (при прочих равных параметрах) по сравнению с системами с TDMA (МДВР). Это объясняется меньшей энергией сигнала на один бит информации. Известно, что энергия сигнала  $E_C$  определяется как

$$E_C = P_C \cdot T_C,$$

где  $P_C$  – мощность, а  $T_C$  – длительность сигнала. Понятно, что при уменьшении длительности сигнала (времени передачи одного информационного бита для цифровой системы) пропорционально уменьшается энергия. Например, для систем TETRA, с четырьмя информационными каналами на одной физической частоте эквивалентная мощность на бит информации в 4 раза меньше, чем в системах с FDMA, что равносильно снижению дальности связи ориентировочно на 40 %.

Другим фактором, влияющим на снижение дальности связи в системах с TDMA по сравнению с FDMA-системами, является устойчивость канала связи при многолучевом распространении сигнала, возникающем в условиях плотной городской застройки или холмистой местности из-за отражения сигнала от зданий и других преград и приводящем к появлению радиоэха. Отраженный сигнал оказывает тем большее влияние, чем больше его отношение к длительности сигнала. Поэтому уменьшение длительности информационного бита в системах с TDMA ухудшает качество приема в условиях многолучевости. (Принципиально можно добиться компенсации задержки сигнала, однако это требует применения различных типов приемников для различных условий распространения сигнала.)

Во многих источниках приводятся данные о приблизительно двукратном снижении дальности связи в системах с TDMA по сравнению с системами с частотным разделением каналов связи.

На сегодняшний день оборудование систем цифровой радиосвязи стоит значительно дороже по сравнению с аналоговыми системами. Как правило, стоимости заключенных контрактов являются коммерческой тайной, однако следует понимать, что при развертывании системы любого из представленных стандартов цифровой радиосвязи, обслуживающей несколько сотен абонентов, речь идет не о тысячах, а о миллионах долларов. Судя по рекламной информации зарубежных фирм, стоимость абонентских радиостанций, работающих в цифровых стандартах, может колебаться в пределах от 800 до 4 тыс. долларов, причем существенная доля стоимости может определяться наличием модулей или программных средств защиты информации.

Сравнение экономической эффективности систем различных стандартов нельзя рассматривать в отрыве от категории системы подвижной радиосвязи. Для создания сетей связи с небольшой нагрузкой, широким территориальным охватом и числом каналов в пределах 10 более оптимальным вариантом (в т.ч. и по стоимости) является использование систем МДЧР, к которым относятся APCO 25 (Фаза I) и Tetrapol. Это объясняется большим радиусом зон обслуживания систем МДЧР по сравнению с МДВР системами. По оценкам, приведенным в техническом отчете стандарта Tetrapol PAS, стоимость базового оборудования многозоновой сети радиосвязи, реализованной на основе МДВР, по отношению к системе с частотным разделением каналов (при одинаковой стоимости единицы оборудования) будет на 30-50 % выше.

Однако, для сетей связи с интенсивным трафиком и числом каналов в одной зоне более 15 предпочтительно использование систем с временным разделением каналов, к которым относится TETRA.

Следует отметить, что стандарт APCO25 (Фаза II) будет обладать универсальностью, обеспечивая возможность строить системы как с частотным, так и с временным разделением каналов.

Нет никаких сомнений в преимуществах цифровых систем по сравнению с аналоговыми. К ним относятся и повышение конфиденциальности переговоров, и наличие усовершенствованной системы идентификации абонентов, и более эффективное использование радиочастот (в отведенной полосе можно организовать больше телефонных каналов за счет компрессии речевого потока и применения современных схем модуляции), и выравнивание качества передачи по всей зоне обслуживания, и возможность дистанционного управления абонентской радиостанцией вплоть до ее включения/выключения, и определение местоположения абонента, и выполнение ряда других специфических задач. Немаловажно, что одно и то же абонентское устройство допускается использовать для передачи и приема речи,

данных, факсимильных сообщений, сигналов персонального радиовызова и др. (фактически можно создавать цифровые сети с интеграцией служб).

Осознав богатство возможностей цифрового транкинга, согласимся с тем, что он нужен в России. Пройдет еще несколько лет, и основные поставщики прекратят выпуск аналогового транкингового оборудования. И тогда проблема высокой стоимости услуг еще более обострится: когда производство перестает быть массовым, это, как известно, снижению цен не способствует.

Краткий сравнительный анализ данных стандартов цифровой транкинговой радиосвязи по основным рассмотренным критериям позволяет сделать определенные выводы о перспективности их развития как в мире, так и в России.

Стандарт EDACS практически не имеет перспектив развития. По сравнению с другими стандартами, он имеет меньшую спектральную эффективность и менее широкие функциональные возможности. Компания Ericsson не планирует расширять возможности стандарта и практически свернула производство оборудования.

Стандарт iDEN не предусматривает многих специальных требований, а также, несмотря на высокую спектральную эффективность, ограничен необходимостью использования диапазона 800 МГц. Вероятно, что системы данного стандарта имеют определенный потенциал и будут еще разворачиваться и эксплуатироваться, в особенности в Северной и Южной Америке. В других регионах перспективы развертывания систем данного стандарта выглядят сомнительными.

Стандарт TetraPol имеет хорошие технические показатели и достаточные функциональные возможности, однако так же, как и стандарты EDACS и iDEN, не обладает статусом открытого стандарта, что может существенно сдерживать его развитие в техническом плане, а также в части стоимости абонентского и стационарного оборудования.

Стандарты TETRA и APCO25 обладают высокими техническими характеристиками и широкими функциональными возможностями, включая выполнение специальных требований силовых структур, имеют достаточную спектральную эффективность. Самым главным доводом в пользу этих систем является наличие статуса открытых стандартов. Однако неоспоримым преимуществом стандарта APCO25 по сравнению с TETRA является большая дальность связи и большая экономическая эффективность.

#### Список условных сокращений

APCO25 – стандарт цифровой транкинговой радиосвязи, разработанный Ассоциацией официальных представителей служб связи органов общественной безопасности (Association of Public Safety Communications Officials-international)

CAI – Common Radio Interface – Общий радиointерфейс

CEPT – Conference of European Posts and Telecommunications - Конференция европейских организаций связи

DID – Direct Inward Dialing – Аппаратура прямого набора номера

EDACS – Enhanced Digital Access Communication System – Стандарт цифровой транкинговой радиосвязи, разработанный фирмой Ericsson (Швеция)

EIA – Electronic Industries Alliance – Ассоциация электронной промышленности

ETSI – European Telecommunications Standards Institute – Европейский институт телекоммуникационных стандартов

GPS – Global Position System – Глобальная спутниковая навигационная система

iDEN – integrated Digital Enhanced Network

ITU – International Telecommunications Union - Международный Союз Электросвязи (МСЭ)

MoU TETRA – Ассоциация «Меморандум о взаимопонимании и содействии стандарту TETRA»

O&M – терминал технического обслуживания и эксплуатации

RS-232C – Стандарт интерфейса физического уровня, который поддерживает несбалансированных схем на скорости до 64кбит/с

SINAD – Отношение уровня сигнала к сумме уровней сигнала к сумме уровней сигнала, шумов и продуктов искажения сигнала

TETRA – Terrestrial Trunked Radio (Наземное транкинговое радио) – стандарт цифровой транкинговой радиосвязи, разработанный институтом ETSI

TETRA V+D – TETRA Voice + Data – стандарт на интегрированную систему передачи речи и данных

TETRA PDO – TETRA Packet Data Optimized – Стандарт, описывающий специальный вариант транкинговой системы, ориентированной только на передачу данных

АС – абонентская станция

БС – базовая станция

МДВР (TDMA) – Многостанционный доступ с временным разделением

МДЧР (FDMA) – Многостанционный доступ с частотным разделением

ПМР – Профессиональная мобильная радиосвязь

СКП – Сеть с коммутацией пакетов

ТСР – Транкинговые системы радиосвязи

ТфОП – Телефонная сеть общего пользования

## 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

### 4.1. Система спутниковой связи DVB-RCS2

Выбор режима работы бортового усилителя мощности (БУМ) многоканальной нисходящей линии связи (НхЛС) определяет эффективность функционирования последней в целом. В качестве усилительного каскада используются ЛБВ различного типа, обладающие необходимой выходной мощностью и регламентированным потреблением от первичного источника питания. Для выбора режима работы усилительного прибора традиционно используется подход, основанный на оценке уровня комбинационных составляющих при испытании в двухсигнальном режиме. Такой подход вполне себя оправдывает в случаях, когда расчёт режима усилительного прибора ведётся в отрыве от сквозного проектирования линии связи.

Появление таких систем проектирования и моделирования радиоэлектронных устройств, как System Vue, дало возможность разработчикам проводить расчёт и оптимизацию режима работы БУМ в составе линии связи, одним из звеньев которой он и является. Отсюда вытекают, по крайней мере, две задачи. Первая из них заключается в оценке энергетики канала связи. А вторая – в выборе критерия, дающего возможность учесть влияние выбранного режима работы БУМ на показатели качества НхЛС.

Выбор режима работы БУМ проводился путём моделирования на полномасштабной модели НхЛС, в состав которой включены передатчик и антенная система БСА, трасса с учётом типовых значений затухания сигнала, антенна наземной станции, малошумящий усилитель приёмного устройства, полосовой фильтр и демодулятор сигнала с квадратурной ФМ4. Моделирование проводилось в среде System Vue, предназначенной для системотехнического моделирования устройств формирования и обработки сигналов.

Модель включает следующие основные функциональные блоки:

- блок формирования 8-ми квадратурных сигналов ФМ-4 с частотным разделением каналов;
- предварительный усилитель с регулируемым значением коэффициента усиления, предназначенный для задания режима работы ЛБВ;
- усилитель мощности сигнала, выполненный на ЛБВ;
- блок, имитирующий среду распространения сигнала на трассе, коэффициент передачи которого учитывает коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн, потери в антенно-фидерной системе (АФС) передатчика, затухание в свободном пространстве, дополнительные потери в дожде и т.п.;

- малошумящий усилитель приёмного устройства наземной станции, полосовой канальный фильтр и демодулятор сигнала ФМ-4;
- блок индикации вероятности ошибок демодуляции.

Согласно ТЗ линия связи БСК-НСК должна обеспечить:

- количество приемных трактов - один;
- количество каналов в тракте - два;
- метод разделения каналов - частотный;
- метод расширения спектра - ФМ ШПС;
  - скорость передачи данных от 4 до 2000 кбит/с (по дискретному ряду скоростей);
- занимаемая полоса частот не более 120 МГц.

Имитатор средств информационного взаимодействия между БСК и НСК по НхЛС должен обеспечивать:

- количество передающих трактов - один;
- суммарная скорость передачи данных от 34 до 544 Мбит/с;
- дискретность изменения скорости - 34 Мбит/с;
- тип модуляции – квадратурная фазовая манипуляция (ФМ-4);
- вероятность ошибки на бит -  $1 \cdot 10^{-6}$ , не менее;
- метод частотного уплотнения (в одном тракте) - четыре несущих;
- максимальная скорость передачи на одной несущей - 136 Мбит/с;
- полоса частот передающего устройства - 800 МГц;

номинальная выходная мощность в каждом передающем тракте в режиме насыщения - 50 Вт.

Разработанная модель линии связи БСК-НСК полностью удовлетворяет ТЗ.

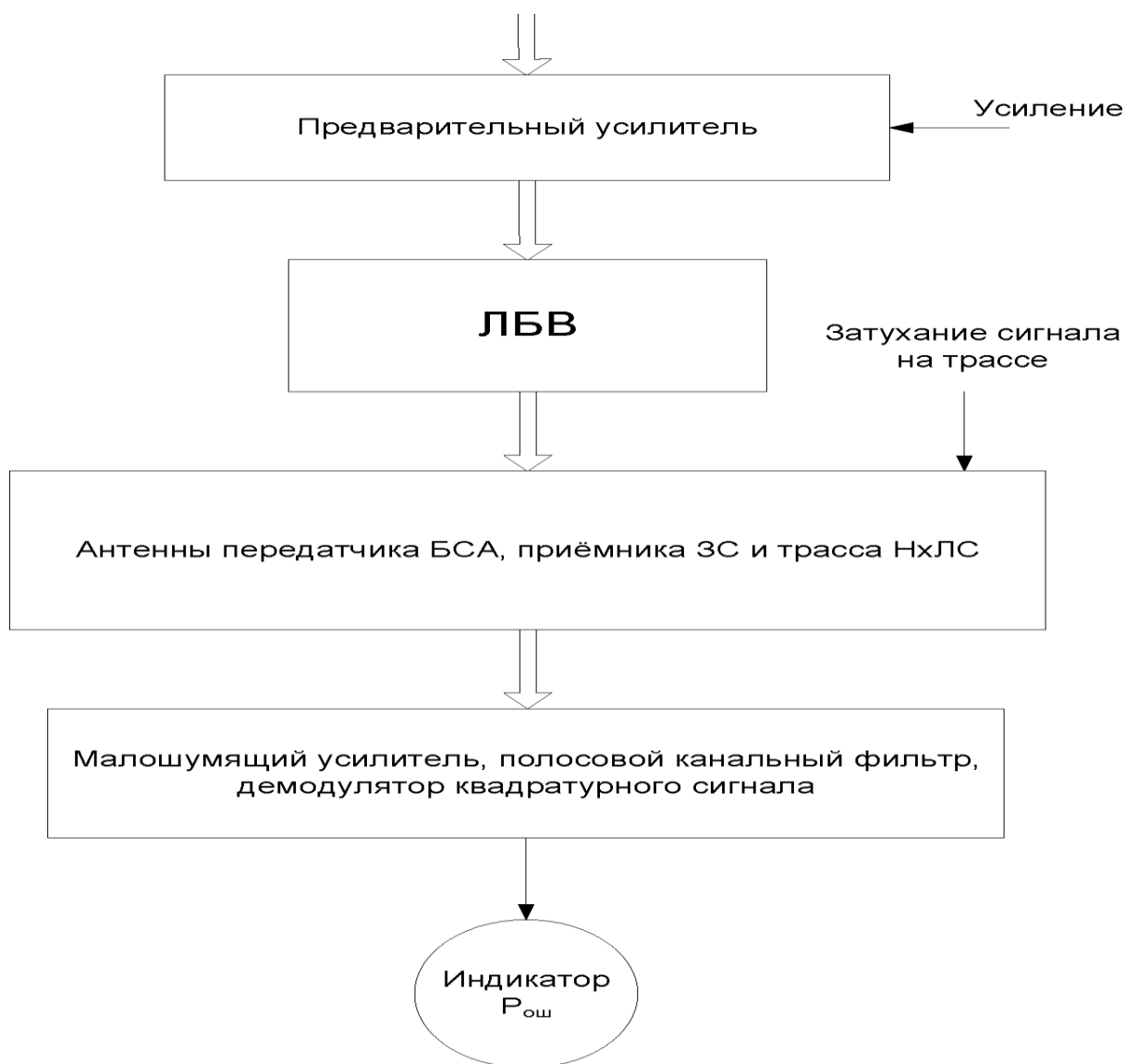


Рис. 4.1. Структура модели линии связи БСК-НСК

Скорость каждого из источников информации составляет 34 Мбит/с. После добавления служебной информации и проверочных бит помехоустойчивого кодера битовая скорость возрастает до 40 Мбит/с в каждой из квадратур. Таким образом, итоговая битовая скорость в каждом частотном канале составляет 80 Мбит/с. При формировании сигналов в найквистовом канале применяются фильтры, формирующие спектр сигнала. При этом ширина спектра на выходе фильтра составляет 20 МГц на видеочастоте и 40 МГц на радиочастоте [1-5].

Для имитации прохождения сигнала с выхода бортового усилителя мощности БУМ до входа МШУ приёмного устройства в модели НхЛС применён блок с переменным значением коэффициента передачи.

На вход БУМ подаются восемь сигналов с квадратурной модуляцией ФМ-4, каждый из которых на своей поднесущей частоте. Предусмотрена регулировка уровней

сигналов частотных каналов, которые могут изменяться в диапазоне от 10 дБ до 40 дБ. Расстановка частот – равномерная. Число частотных каналов в штатном режиме равно восьми. Модель приёмного устройства включает малошумящий усилитель с шумовой температурой  $T_{ш} = 300$  К, полосовой фильтр, полоса которого больше ширины спектра группового сигнала, полосовой фильтр одного парциального канала и демодулятор квадратурного сигнала ФМ-4 этого канала. В модели симитированы системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и тактовой синхронизации (СТС), необходимые для нормального функционирования собственно демодулятора.

Подсчёт количества неправильно демодулированных электрических символов производится в блоке расчёта вероятности ошибки демодуляции сигнала.

Для большинства задач используется механизм системы System Vue, дающий возможность автоматически регулировать при моделировании объёмы выборок для расчёта вероятности ошибки с заданной точностью и проводить циклические измерения, варьируя с определённым шагом значения контролируемого параметра задачи.

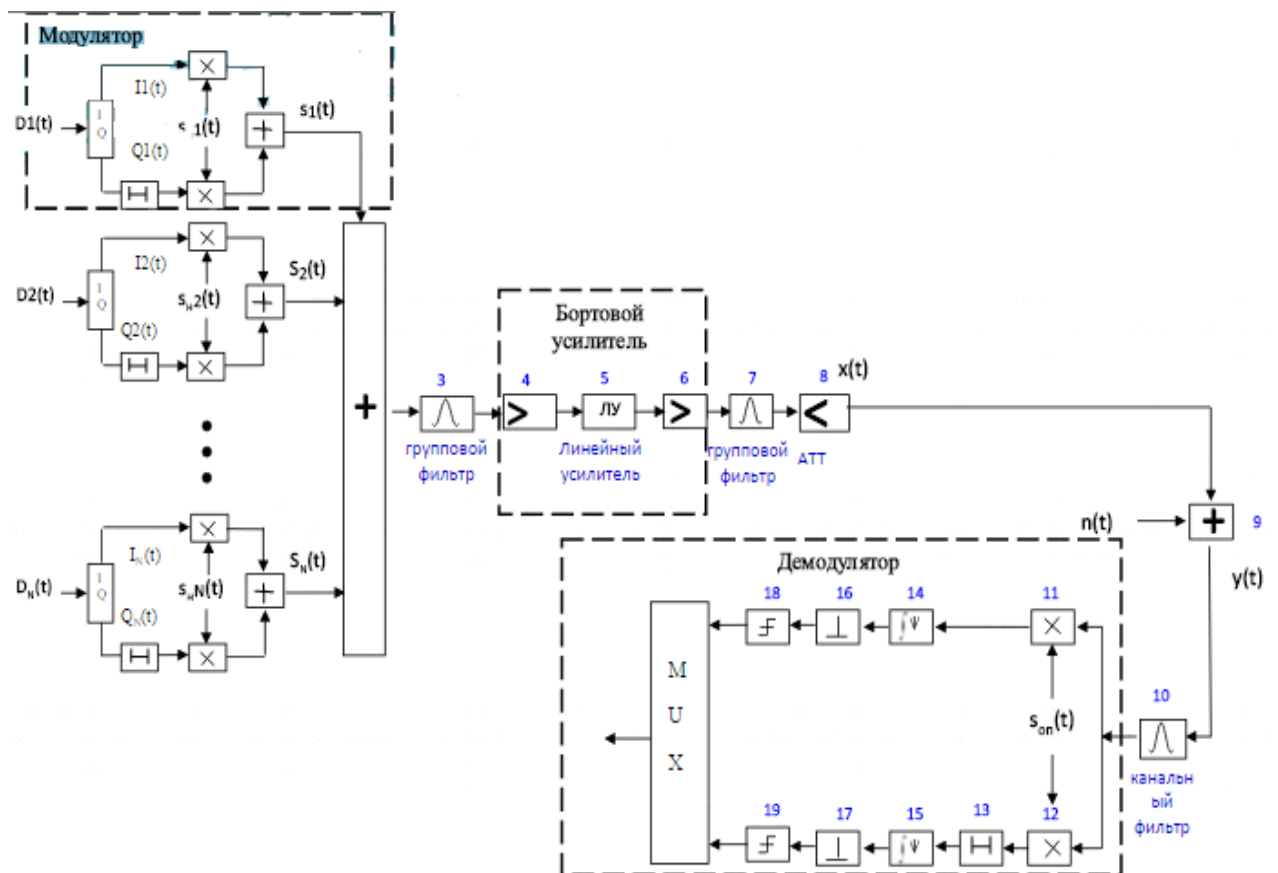


Рис. 4.2. Функциональная схема спутникового канала связи с бортовым усилителем



### Модель многочастотного входного сигнала

В данном подразделе рассмотрена модель формирования группового сигнала, распределённого между восьмью частотными каналами, каждый из которых содержит парциальный сигнал с квадратурной модуляцией ФМ-4. Модели формирования каждого парциального сигнала одинаковы по структуре и отличаются лишь центральной частотой канала. Поэтому достаточно рассмотреть модель одного канала, детальное описание которого приведено ниже.

Модель источника одного сигнала приведена на рисунке 3.3.

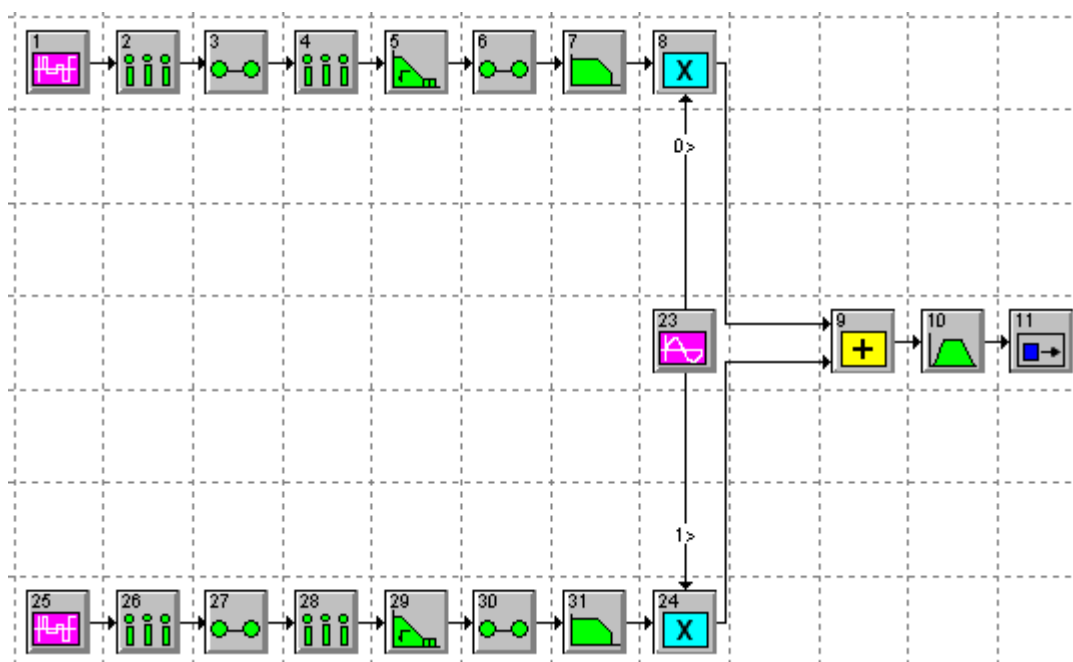


Рис. 4.3. Модель источника сигнала

Каждый сигнал является суммой двух идентичных независимых ортогональных сигналов ФМ2. Опорные сигналы модулируются низкочастотными напряжениями на выходе элемента 7 в верхнем канале и на выходе элемента 31 в нижнем канале, сформированными из независимых псевдослучайных двоичных информационных потоков

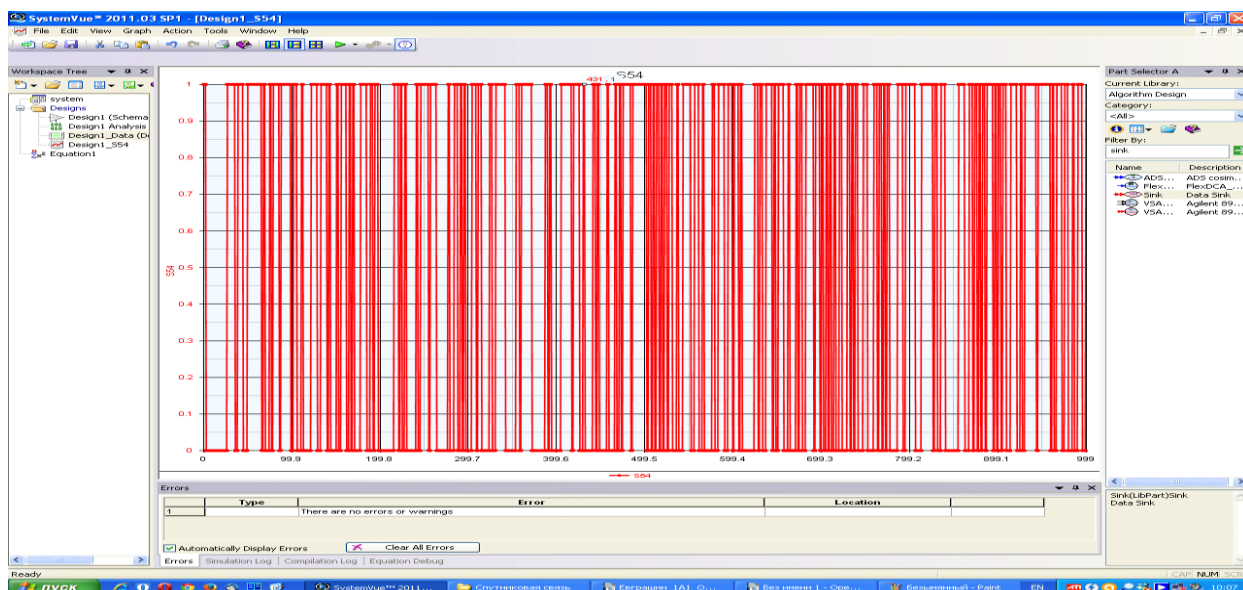


Рис. 4.4. Сигнал на входе (имитирует входную последовательность линии связи БСК-НСК)

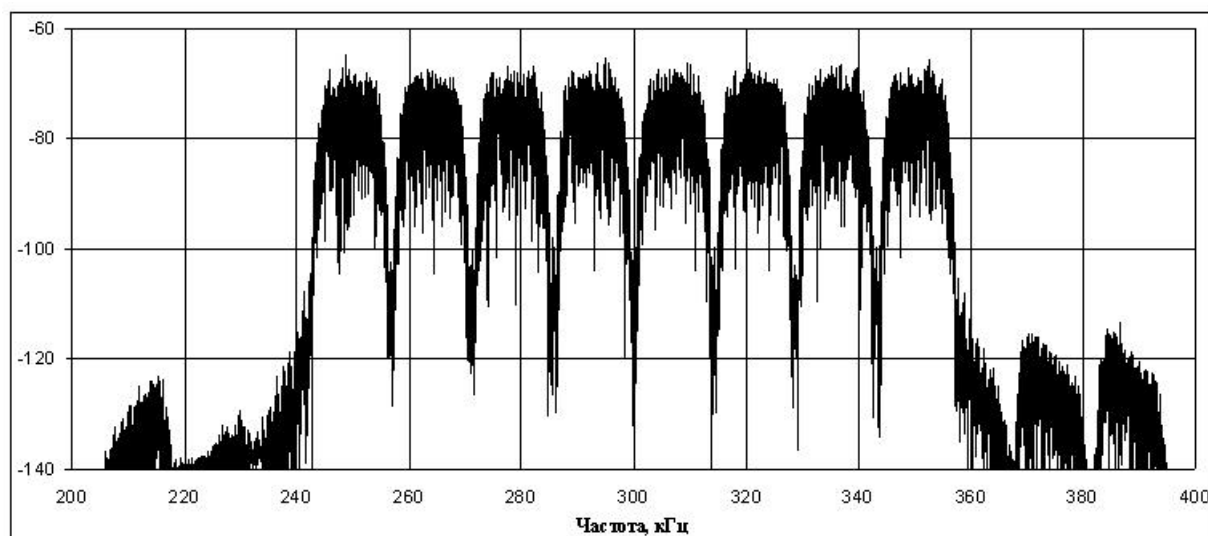


Рис. 4.5. Спектр группового сигнала восьми частотных каналов модели НхЛС (в модели рассматривается на низкой частоте)

Модель блока нелинейного усилителя мощности в совокупности с источником группового сигнала является составной частью модели канала связи. Схема этих частей канала приведена на рисунке 4.6.

Групповой сигнал с выхода сумматора (элемент 12) поступает на предварительный усилитель (элементы 13 и 14) и модель собственно усилителя на ЛБВ, в состав которого входят нелинейный инерционный элемент 15 и усилитель 16, моделирующий усиление усилителя на ЛБВ.

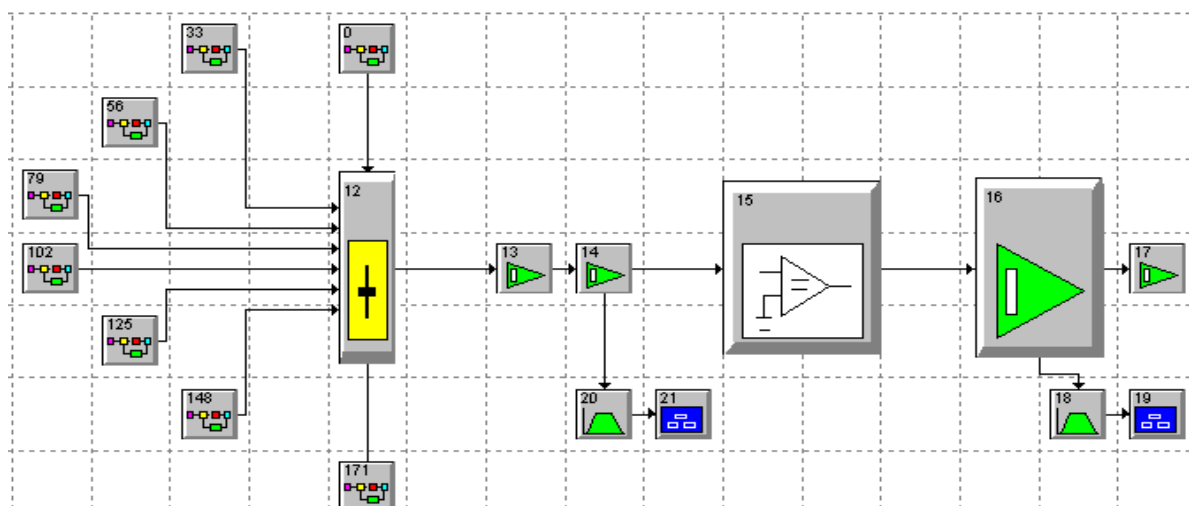


Рис. 4.6. Модель источника группового сигнала и БУМ

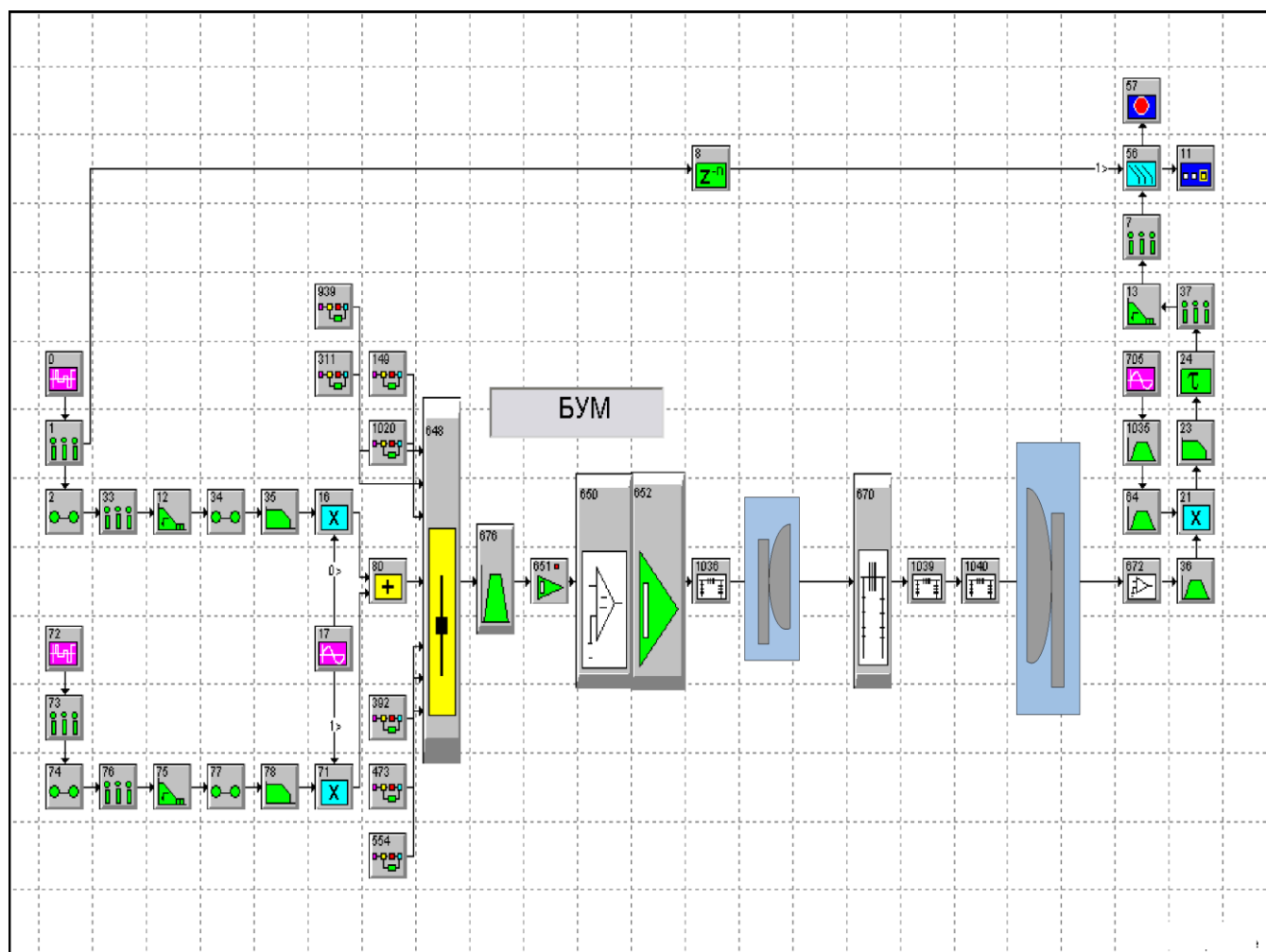


Рис. 4.7. Модель линии связи БСК-НСК

Модель приёмного устройства включает малошумящий усилитель с шумовой температурой  $T_{ш} = 300$  К, полосовой фильтр, полоса которого больше ширины спектра

группового сигнала, полосовой фильтр одного парциального канала и демодулятор квадратурного сигнала ФМ-4 этого канала. В модели симулированы системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и тактовой синхронизации (СТС), необходимые для нормального функционирования собственно демодулятора.

В результате моделирования получена зависимость BER (вероятность битовой ошибки) от потерь на трассе (рис.4. 8.)

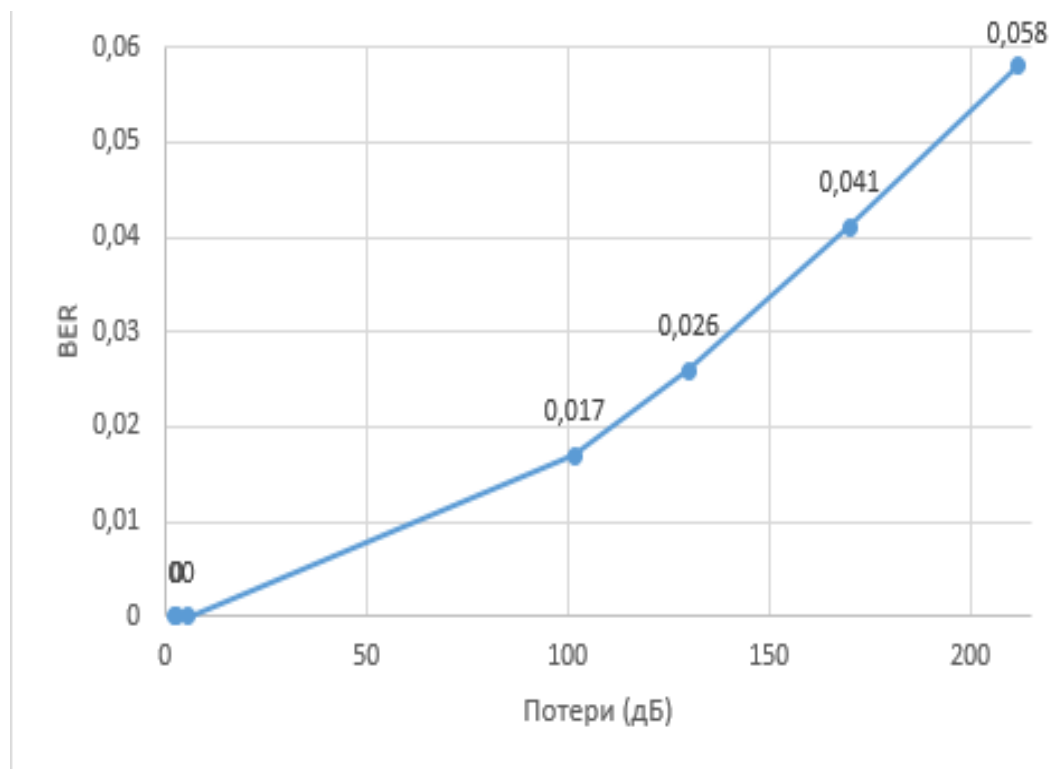


Рис. 4.8. Зависимость BER от потерь на трассе

Неблагоприятные погодные условия приводят к увеличению потерь, что в свою очередь приводит к увеличению битовой вероятности ошибки. Данные потери не могут быть компенсированы изменением режима работы БУМ. В случае ясной погоды, наоборот, произойдет увеличение мощности принимаемого сигнала, что приведёт к уменьшению битовой вероятности ошибки.

Уменьшение числа ошибок достигается использованием сигнально-кодовых конструкций в стандарте DVB-RCS [4-9]. Совместное использование цифровых модуляций QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK - и каскадных кодов BCH - LDPC позволяет снизить битовые ошибки.

Схема кодирования основана на взаимной связи кодов LDPC и БЧХ. Коды LDPC, могут обеспечить чрезвычайно низкие частоты появления ошибок вблизи пропускной способности канала, используя алгоритм итеративного декодирования с низкой плотностью. Внешние коды БЧХ используются для коррекции случайных ошибок,

создаваемых декодером LDPC. Закодированная последовательность поступает на блочный перемежитель и затем модулируется с использованием метода фазовой манипуляции M-PSK и передается по каналу с заданным уровнем шума.

Созвездия, полученные при модулировании, для различных отношений энергии бита к спектральной мощности шума (SNR) представлены на рисунках 9 – 12:

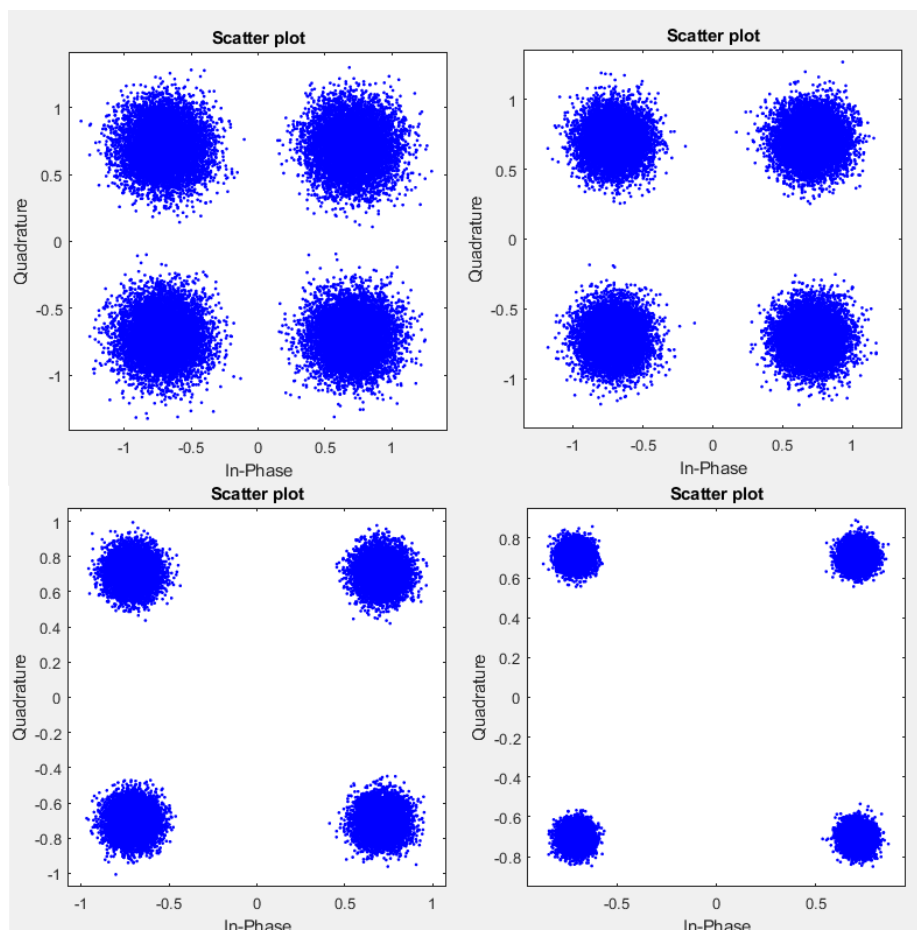


Рис. 4.9. Созвездия QPSK 9/10 для разных SNR

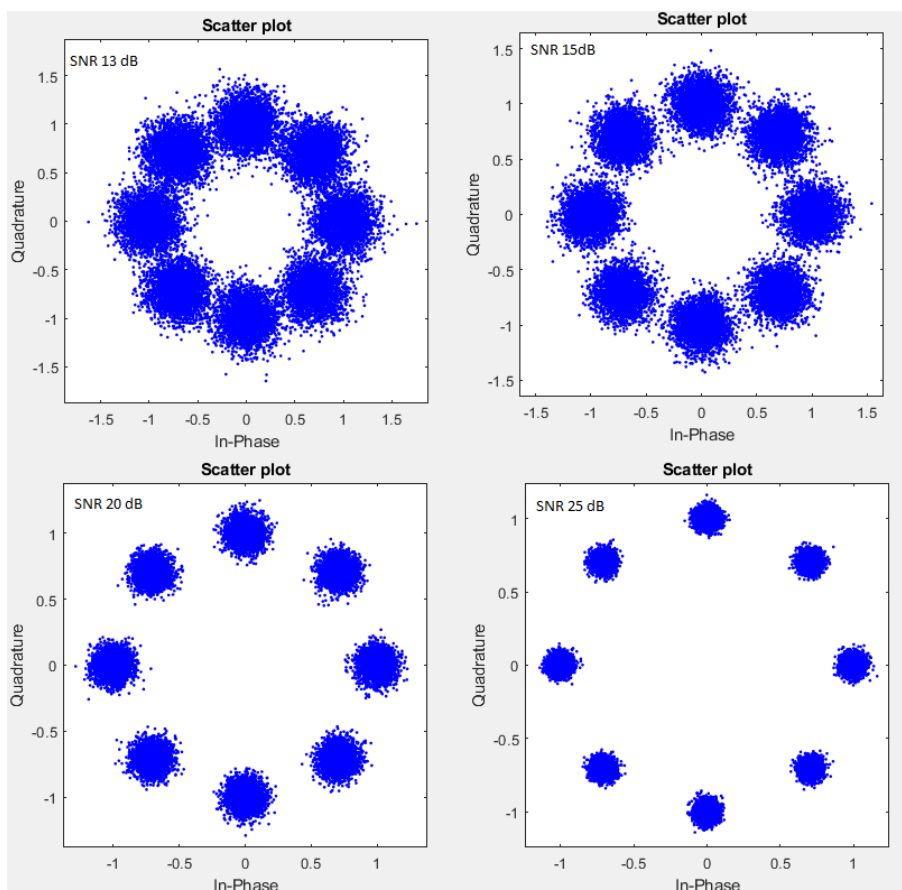


Рис. 4.10. Созвездия 8PSK 9/10 для разных SNR

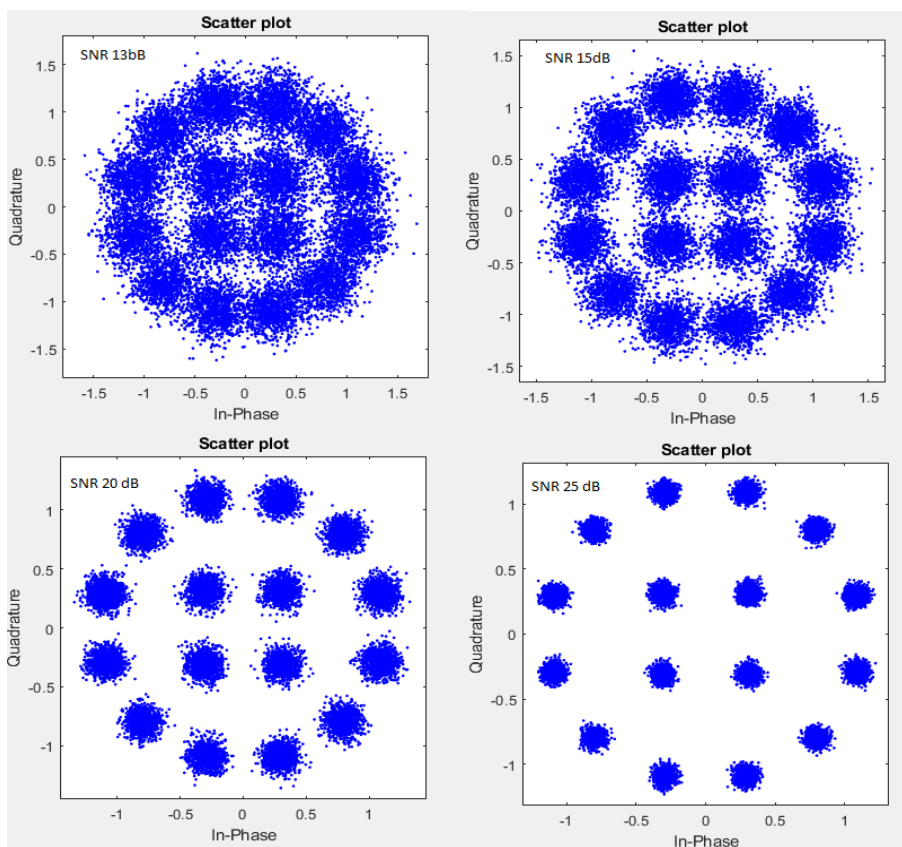


Рис. 4.11. Созвездия 16APSK 9/10 для разных SNR

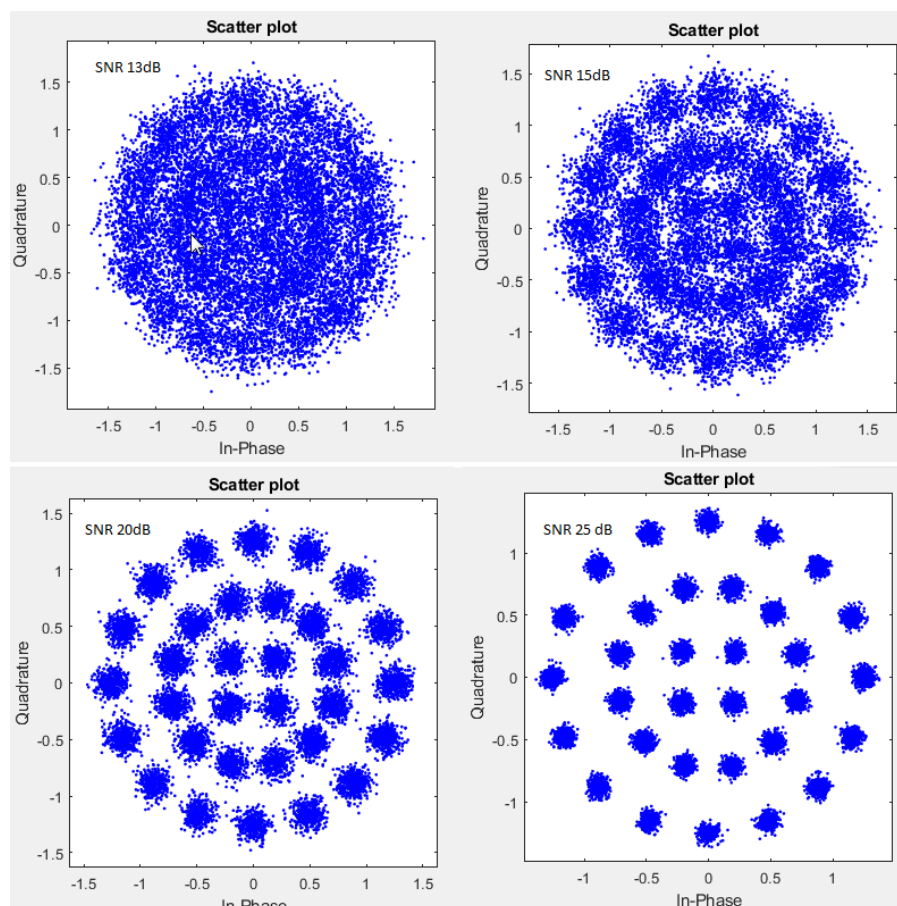


Рис. 4.12. Созвездия 32APSK 9/10 для разных SNR

В результате моделирования получены зависимости BER от SNR для различных скоростей кодирования LDPC.

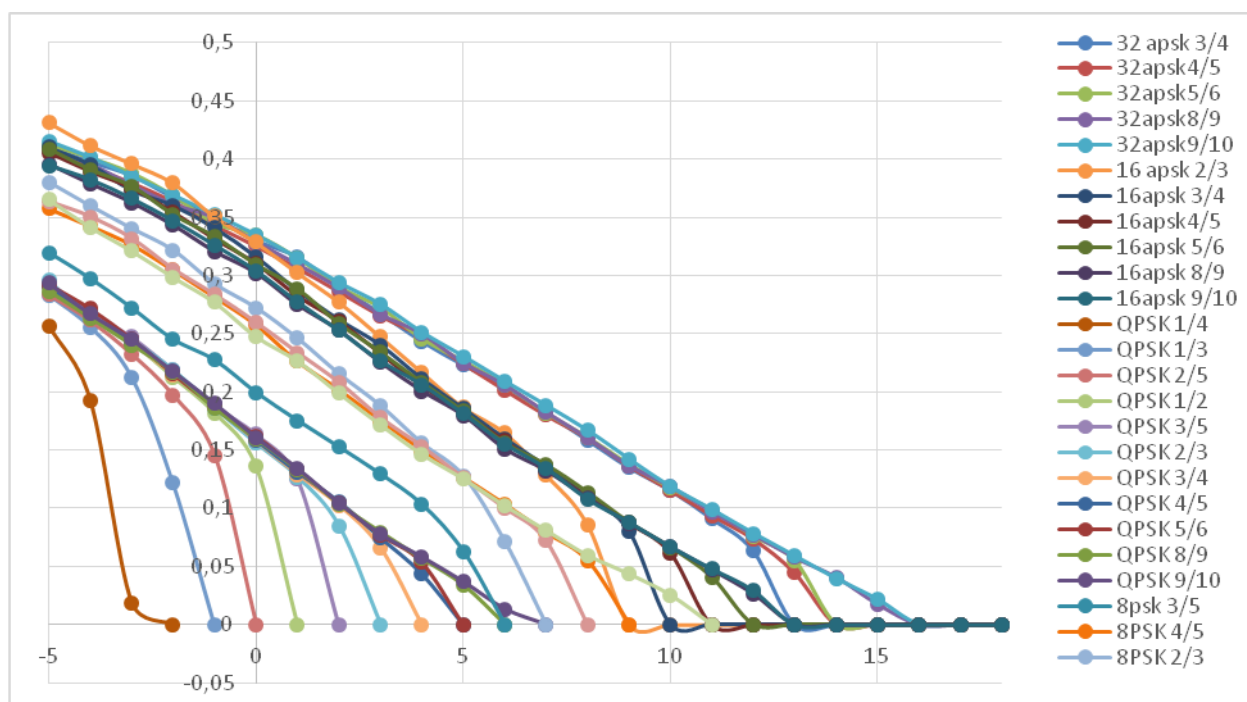


Рис. 4.13. Зависимость BER от SNR после декодирования LDPC

Анализ рисунка 4.13 показывает, что квадратурная фазовая манипуляция позволяет передавать данные с наименьшей ошибкой, чем другие представленные модуляции при



прочих равных условиях. Применение же модуляции 32-APSK позволит увеличить скорость передачи данных в 2,5 раза.

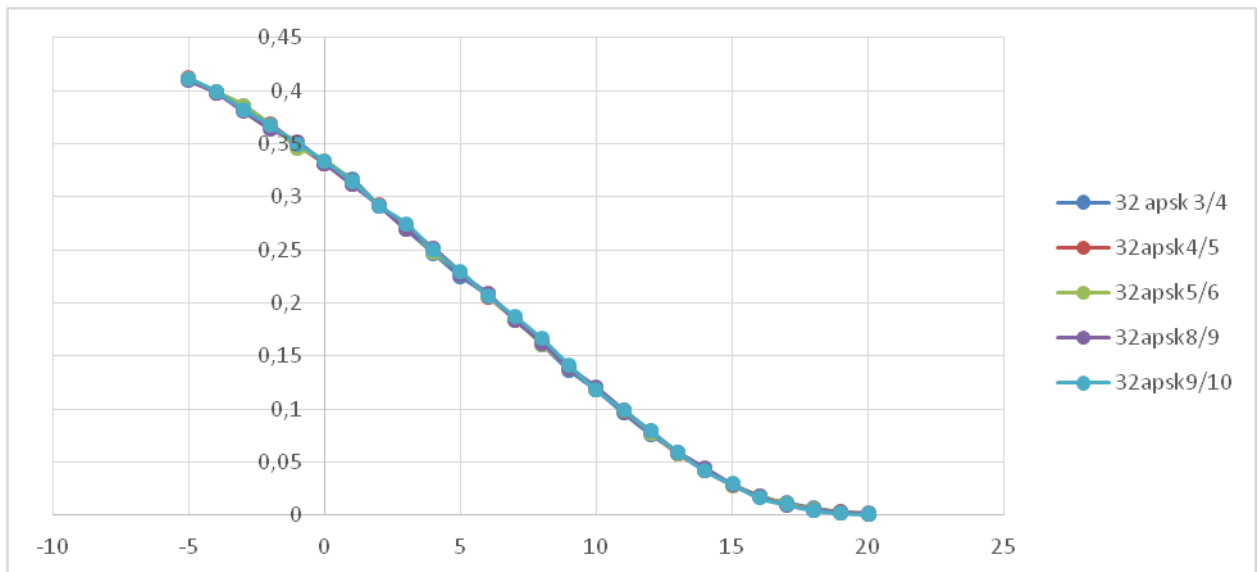


Рис. 4.14. Зависимость BER после демодулирования от SNR для одного вида модуляции с разными скоростями кодирования

Из рисунка 4.14 видно, что все графики наложены друг на друга, отсюда следуют, что BER после демодулирования не зависит от скорости кодирования.

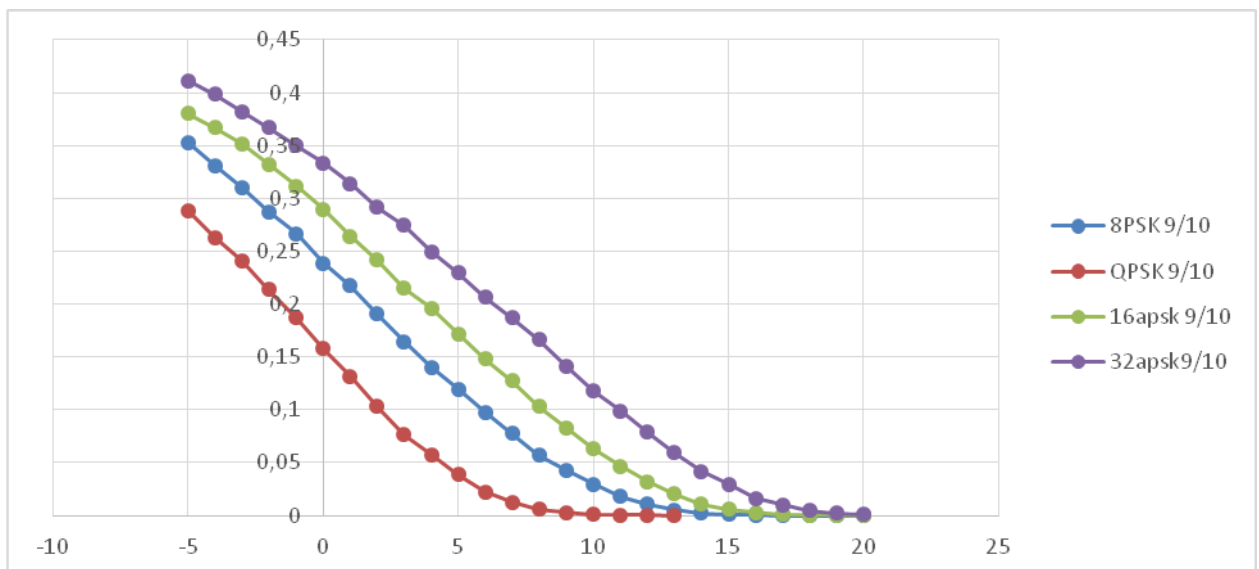


Рис. 4.16. Зависимость BER от SNR после демодулирования для разных видов модуляции с одинаковой скоростью кодирования.

Из рисунка 4.15 видно, что для QPSK обладает наилучшей помехозащищенностью.

В результате моделирования установлено, что QPSK обладает наилучшей помехозащищенностью, 32APSK амплитудно-фазовая манипуляция позволяет передавать данные с большей скоростью.



### Модель командной линии связи (НСК-БСК)

Командная линия построена на основе режима многочастотного доступа с разделением по времени (MF-TDMA) (линия вверх). На рисунке 4.17 представлена схема аппаратно-программного комплекса в среде разработки Simulink для стандарта MF-TDMA.

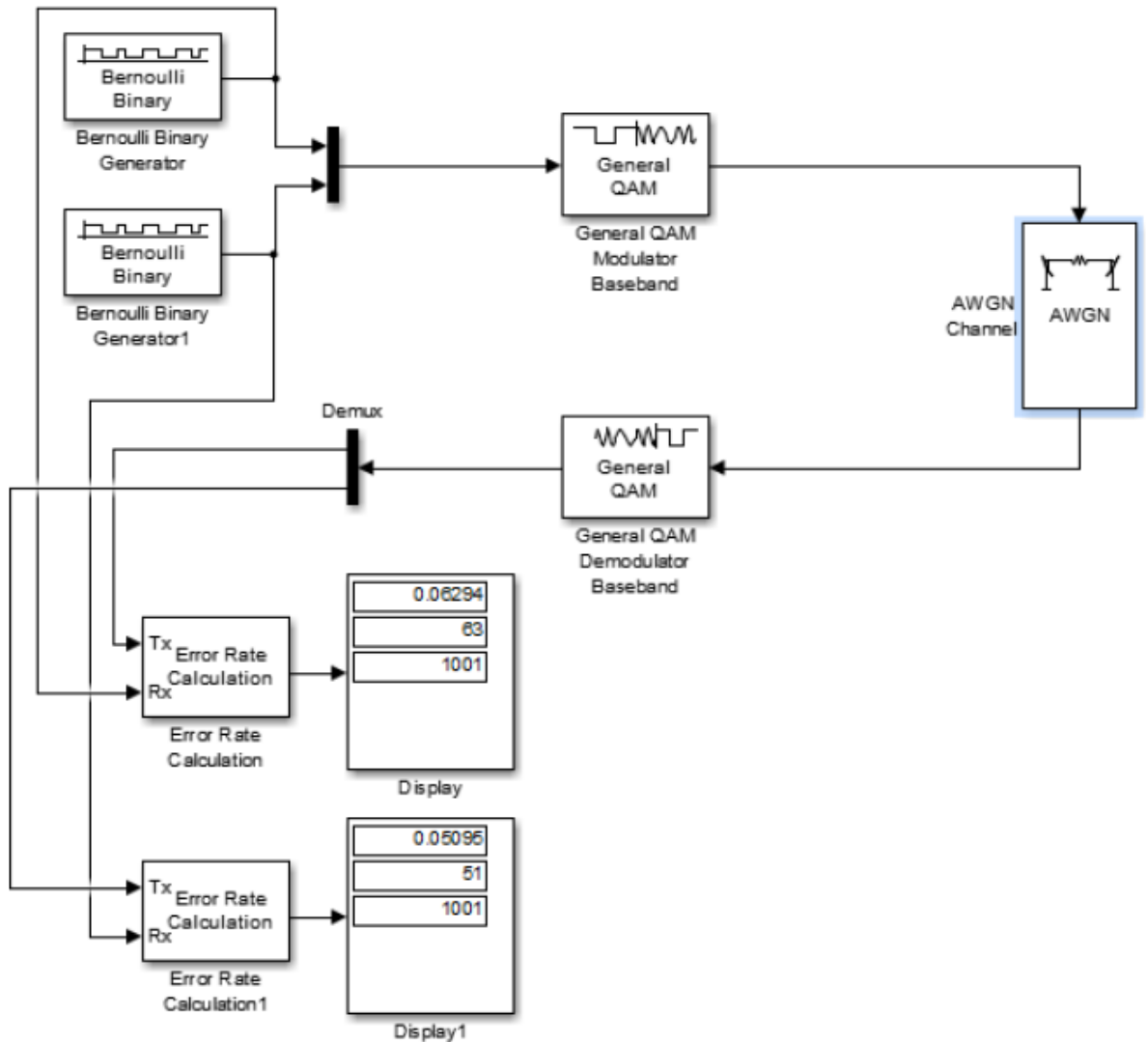


Рис. 4.17. Реализация аппаратно программно комплекса MF-TDMA.

Работа комплекса основана на работе двух генераторов двоичной псевдослучайной последовательности Бернулли, имитирующих входной сигнал, который модулируется с использованием метода фазовой манипуляции M-PSK и передается по каналу с заданным уровнем шума. В итоге на разностном устройстве для оценки количества и частоты ошибок между передающимся и принимаемым сигналом получаем вероятность битовой ошибки BER.

Построены зависимости BER от SNR для первого и второго генератора последовательностей.

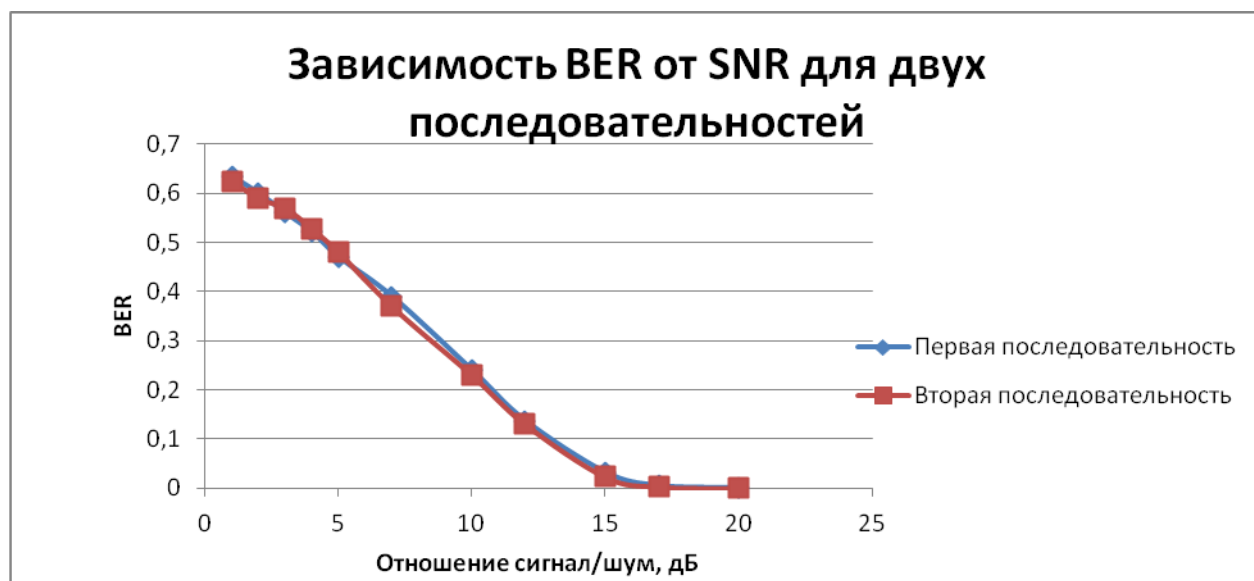


Рисунок 4.18. Зависимость BER от SNR для двух последовательностей

#### 4.2. Разработка системы космической связи для подводной роботизированной сети глайдеров

С конца 2011 года Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ) проводит комплексные исследования в обеспечение создания глобальной информационно-измерительной системы, использующей в своем составе различные типы морских роботизированных объектов (МРО) - глайдеров.

К рассматриваемым МРО отнесены следующие автономные необитаемые измерительные/обеспечивающие платформы: подводные глайдеры, буи и зонды переменной плавучести, поверхностные волновые буи, волновые глайдеры, донные коммуникационные станции, узлы подводной стыковки-расстыковки мобильных автономных роботизированных объектов, буферные преобразователи-накопители энергии океана и солнца.

Перечисленные МРО в совокупности образуют комплекс технических средств - эффективных элементов морской информационно-коммуникационной сети двойного назначения.

Длительное автономное скрытное нахождение на маршруте или в заданном районе плавания с целью сбора оптических, гидроакустических, гидрофизических, химических и радиационных параметров и данных, с передачей их по оптическому или радио- и гидроакустическому каналам по мере накопления или по выявлению заданного события, формирование единого информационного пространства, обеспечение обмена

данными с погруженными объектами, ретрансляции информации через каналы спутниковой связи, БПЛА и надводные МРО определяет востребованность рассматриваемых типов МРО для решения оперативно-тактических задач ВМФ.

Поэтому на сегодня МРО рассматриваются военными специалистами в качестве одного из перспективных средств повышения боевой эффективности военно-морских сил.

Помимо применения в военной сфере можно констатировать использование МРО для широкого круга научных, исследовательских и прикладных задач, связанных с освоением и мониторингом Мирового океана, поддержкой решения экологических задач, задач прогнозирования климата, контроля биоресурсной базы, разработкой подводных месторождений полезных ископаемых, сейсморазведкой, использованием в качестве средств контроля и оповещения в чрезвычайных ситуациях, обеспечением комплексной безопасности объектов морского нефте-газового комплекса.

Перечисленные направления использования говорят о том, что МРО - это современная технология, обеспечивающая независимость политического и экономического положения в мире за счет повышения оперативности и экономической эффективности проводимых работ.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к разработкам МРО двух основных типов: подводным глайдерам и волновым глайдерам.

Подводные глайдеры, использующие для своего поступательного движения принцип изменения остаточной плавучести, обеспечивающий их перемещение по наклонной траектории в режимах погружения-всплытия, обладают набором неоспаримых преимуществ - сверхбольшой автономностью, сверхбольшой дальностью хода, "удобными" при эксплуатации массогабаритными характеристиками, сверхмалой шумностью, относительно низкой стоимостью производства и эксплуатации.

Подводные глайдеры являются эволюционным развитием дрейфующих буев, при этом они наделены новыми качествами: мобильностью – способностью "покрывать" значительные по площадям акватории; эффективным использованием в составе роботизированных комплексов различного назначения; эффективными процедурами сбора информации и ее передачи в центр обработки в масштабе времени близком к реальному; оперативной корректировкой программного задания миссии, определяемой

возможностями современных телекоммуникационных технологий и количеством одновременно используемых глайдеров, объединенных в группу ("стаю") той или иной задачей.

Глубины погружения современных подводных глайдеров практически неограничены (до 6000 м), что говорит о возможности использования их для различных прикладных задач – исследования донных районов океана, континентальных шельфов, прибрежных акваторий и мелководных зон.

Волновые глайдеры – приповерхностные МРО - используют иной принцип перемещения, основанный на использовании возобновляемой энергии волн. Ввиду того, что интенсивность волнового движения является наибольшей у свободной поверхности и достаточно быстро убывает с увеличением глубины, то этот факт позволяет создать двухкомпонентный аппарат, состоящий из надводного модуля ("поплавка") и подводного модуля (системы колеблющихся крыльев), соединенных между собой гибкой или жесткой связью.

Движение волнового глайдера обеспечивается за счет реализации силы тяги, образующейся на колеблющихся крыльях в результате вертикальных колебаний, вызванных волновым движением "поплавка", и свободных вращательных колебаний относительно оси закрепления крыльев на подводном модуле. При этом главное отличие волнового глайдера от свободно дрейфующих буев состоит в том, что глайдер не дрейфует, а перемещается по заданной программе миссии и независимо от направления движения волн.

Функциональность указанных типов МРО может быть расширена за счет реализации различных алгоритмов их группового ("стаино") использования. Эффективность решения задач возрастает при использовании "группировок" МРО в комплексе с объектами-носителями: кораблями, подводными лодками и аппаратами. Это означает, что если каждый роботизированный объект способен выполнять относительно простые операции, то в комплексе с другими аппаратами – могут решаться весьма сложные задачи.

В следствие актуальности и практической значимости данного направления, в период 2011 – 2015 гг в рамках цикла НИОКР в СПбГМТУ проводились интенсивные работы по исследованию, проектированию и разработке опытных образцов: глайдера

торпедной формы, глайдера типа "летающее крыло" и волнового глайдера.



Дальнейшие исследования были направлены на улучшение гидродинамических качеств аппарата, его управляемости, энергоэкономичности, совершенствование системы автоматического управления, а также на проработку возможностей применения различных перспективных технологий и конструктивных решений.

В процессе разработки подводного глайдера второго поколения большое внимание уделялось отработке характеристик объекта с использованием методов математического и имитационного моделирования, экспериментальных методов, параметрического анализа, а также проработке и моделированию функционирования отдельных устройств и механизмов, обеспечивающих достижение требуемых проектных параметров. В обеспечение экспериментальных методов были задействованы аэродинамическая труба СПбГМТУ, опытные бассейны СПбГМТУ и ЗАО "НПП ПТ "Океанос".

В рамках комплексной НИР проводились исследования по оптимизации внешнего облика подводного глайдера, проработке модульной архитектуры аппарата, отработке конструкции, осуществлялась разработка отдельных "критических технологических решений" - механизма изменения плавучести, эффективной системы управления

дифферентом и креном, энергетического модуля повышенной эффективности, изучалась динамика глайдера для различных режимов функционирования, прорабатывалась система автоматического управления движением аппарата, обеспечивающая выполнение важных (с точки зрения построения подводной информационно-измерительной системы) миссий. В результате выполненных исследований СПбГМТУ совместно ЗАО НПП ПТ "Океанос" и ФТИ имени А.Ф. Йоффе разработали опытный образец подводного глайдера второго поколения.

Параллельно с работами по созданию подводного глайдера осуществлялись научно-исследовательские работы, связанные с проектированием волнового глайдера. Опытный образец которого был успешно испытан на полигоне Сам ГТУ в 2013 г.



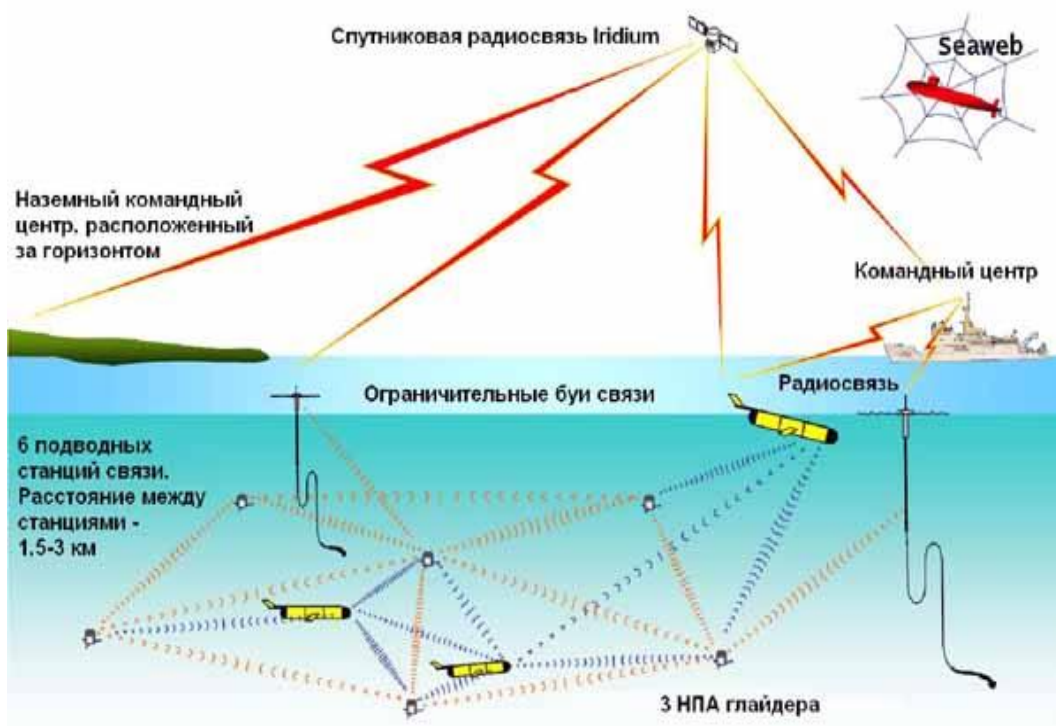
Подводный модуль опытного образца отечественного волнового глайдера СамГТУ-СПбГМТУ / "Океанос НПО", ЗАО

В настоящее время проводятся исследования по отработке конструктивных решений для подводного и надводного модулей волнового глайдера, связанные с учетом влияния на гидродинамические характеристики таких параметров как: оптимальная компоновка крыльевых элементов подводного модуля, исследование влияния упругости элементов по вращательным колебаниям, гидродинамическая форма надводного модуля и пр. Намечено проведение систематических испытаний масштабной модели волнового



глайдера нового облика в опытовом бассейне СПбГМТУ.

Результаты работ по разработкам подводных и волновых глайдеров, проводимых под научным управлением СПбГМТУ, дают основание утверждать, что создание высокоэффективных отечественных мобильных элементов подводной глобальной информационно-измерительной системы двойного назначения движется к успешной реализации.



Информационное взаимодействие глайдеров в составе морских объектов



Схема движения глайдеров

### Слокум Глайдер

Подводные аппараты типа глайдер являются новым классом автономных подводных аппаратов. Благодаря механизму управления собственной плавучестью и

крыльями глайдер преобразует вертикальное движение в горизонтальное, что позволяет ему медленно «скользить» в водной толще по пилообразной траектории. Движение глайдера определяется его формой, размером, массой и ее распределением внутри прочного корпуса аппарата, свойствами окружающей воды.

Такие аппараты предназначены для сбора данных об окружающей среде, составления различных профилей водного столба.

Глайдеры широко применяются в мировой практике для океанографии, исследования течений и мониторинга окружающей среды. По сравнению с обыкновенными АНПА, глайдеры обладают более низкой стоимостью, способностью перемещаться на большие расстояния, а продолжительность времени их непрерывной работы может равняться нескольким месяцам.

Назначение АНПА «Слокум Глайдер»:

Вооруженные силы/МЧС/Береговая охрана:

Освещение подводной обстановки;

Мониторинг параметров водной среды при ЧС (разливах нефти, сейсмоактивности, техногенных авариях в прибрежных зонах).

Добывающие отрасли промышленности:

Предварительная разведка мест подводного строительства;

Подледные исследования;

Мониторинг подводной среды вокруг мест разработок

Исследование и экомониторинг океана:

Оперативный и долговременный мониторинг водной среды;

Измерение гидробиологических, гидрохимических, гидрофизических параметров среды;

Отслеживание изменения параметров водной среды в зависимости от глубины для изучения динамики океанов.

Особенности:

Отсутствие функциональной зависимости от судна-носителя;

Автономность до нескольких месяцев;

Полезная нагрузка определяется заказчиком;

Региональная площадь покрытия;

Широкий диапазон глубин погружения;

Большой объем измеряемых параметров;



Регулярность получения данных через спутник;  
Высокая экономичность эксплуатации.

#### Принцип действия АНПА «Слокум Глайдер»

Глайдер представляет собой автономный необитаемый подводный аппарат, который перемещается в вертикальном направлении посредством изменения плавучести, а в горизонтальном – за счет крыльев и стабилизаторов, установленных на корпусе. Угол дифферента управляется путем сдвига аккумуляторной батареи внутри аппарата. Большую часть времени аппарат свободно глиссирует из одной точки в другую по пилообразной траектории, что делает его экономичным в потреблении энергии и бесшумным.

Когда аппарат находится на поверхности, он осуществляет выход на связь для передачи собранных данных и текущих координат.

АНПА «Слокум Глайдер» имеет модульную структуру, что позволяет менять и устанавливать модули в зависимости от поставленных задач.

#### Навесное оборудование

Существует широкий выбор датчиков, которые может нести глайдер:

Акустический модем;

Акустический датчик обнаружения млекопитающих;

Доплеровский измеритель течений ;

Альтиметр;

Батифотометр;

Оптический сенсор обратного рассеивания;

Сенсор оптического затухания;

Датчик растворенного кислорода;

STD-датчик;

Флуорометр;

Гидрофон;

Датчик активной радиации;

Радиометр;

Датчик рассеивания;

Спектрометр;

Датчик турбулентности и др.

## **Разработка системы связи на базе модели адаптивной двусторонней широкополосной спутниковой системы передачи данных**

Модель построена на стандарте цифровой видео передачи - системы с обратным каналом (Digital Video Broadcast – Return Channel System DVB-RCS), мультисервисная DVB-RCS платформа обеспечивает высокоскоростной спутниковый доступ с приложениями реального времени (передача данных, голос, видео), а также стандартные IP приложения. Нисходящая линия связи DVB-RCS построена на стандарте телевизионного вещания DVB-S2, а восходящая на стандарте MF-TDMA. В работе представлены результаты исследования Simulink моделей DVB-S2 и MF-TDMA для использования двух входных последовательностей. Модель будет использована для проектирования адаптивной двусторонней широкополосной спутниковой системы передачи данных для космических аппаратов МКА. Ключевые слова: Стандарт DVB-RCS, Simulink модели DVB-S2, модели Symulink линии "вверх" MF-TDMA

Топология сети на базе мультисервисной DVB-RCS платформы, как правило, строится по типу «звезда» и подразумевает наличие двух трактов передачи. Прямой канал – спутниковый канал от Центральной земной станции (ЦЗС/HUB) до удаленных спутниковых интерактивных терминалов (СИТ/SIT). Обратный канал - спутниковый канал от терминала до Центральной земной станции

Стандарт DVB-RCS утвержден Европейским институтом стандартизации в области связи (ETSI) в 2000 году. Стандарт предлагает прямой канал, основанный на формате данных DVB/MPEG 2, и обратный канал, на основе режима множественного доступа с разделением по времени (MF-TDMA). Широкополосная несущая DVB/MPEG 2 может обеспечить скорость передачи в прямом канале до 110 Мбит/с, а режим MF-TDMA предусматривает скорость до 2-4 Мбит/с в обратном канале с каждого удаленного терминала.

Стандарт DVB-S2 (прямой канал) предусматривает четыре возможных схемы модуляции.

По сравнению с QPSK, верхняя схема модуляции, 32 APSK, позволяет повысить общую скорость потока в 2.5 раза. Для защиты от помех в новом стандарте, как и в прежних, используется перемежение данных и наложение двухуровневого кода для прямой коррекции ошибок (Forward Error Correction FEC). Но системы внешней и внутренней кодозащиты – другие, чем в стандарте DVB-S. В качестве внешней кодозащиты вместо кода Рида-Соломона используется код Боуза-Чоудхури-

Хоквингема (Bose-Bhauhdhuri-Носquenghem, BCH), а в качестве внутренней, вместо сверхточного кода, – код с низкой плотностью проверок на четность (Low Density Parity Check Codes – LDPC). Критерием выбора была достижимая с помощью кода эффективность передачи в канале, и коду LDPC удалось максимально приблизить ее к пределу Шеннона при соблюдении установленных ограничений на сложность чипа декодера. Код LDPC накладывается на блоки длиной 64800 бит, которые для приложений, чувствительных к задержкам, могут быть сокращены в 4 раза. Относительная скорость передачи может составлять от 1/4, до 9/10. Первый вариант предусматривает передачу трех защитных бит на каждый полезный, а последний, одиннадцати – один контрольный бит на девять полезных.

Новая пара кодов обеспечивает более эффективное использование канального ресурса, чем коды DVB-S. Она позволяет работать при уровнях SNR всего на 0.7 дБ выше требуемого соотношением Шеннона для заданной скорости, в то время как применение свертки в паре с кодом Рида-Соломона требовало превышения этого предела примерно на 5 дБ. Правда, при этом не выполняются условия бесконечно высокой достоверности передаваемой информации, оговоренные в теореме Шеннона. Более того, новый стандарт допускает более высокую частоту ошибок BER на выходе декодера, чем старый. Если кодеры стандарта DVB-S обеспечивают снижение BER до  $10E-10$  –  $10E-11$ , то LDPC в сочетании с BCH снижают его до уровня  $10E-7$ . Такой уровень соответствует появлению одной ошибки в час при передаче потока скоростью 5 Мбит/с. В случае передачи пакетной информации, перед ее подачей в FEC- кодеры, на нее накладывается CRC-8 (Cyclic Redundancy Check) кодирование. А после FEC кодирования данные подвергаются перемежению, защищающему ее от длительных помех.

Реализация модели DVB-S2 (линии "вниз")

Разработана модель в среде разработки Simulink для стандарта DVB-S2.

Результаты исследования Simulink модели DVB-S2.

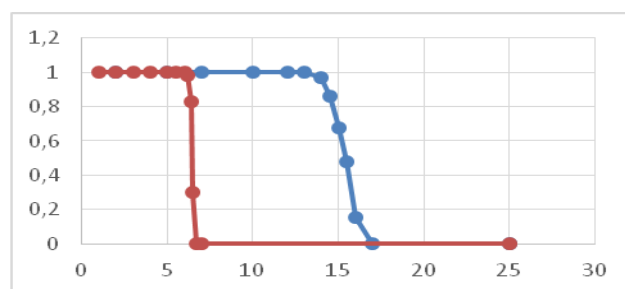


Рис. 4.19. График зависимости BER от SNR на входе/выходе системы. Синяя линия – для QPSK, Красная линия – для 8-PSK

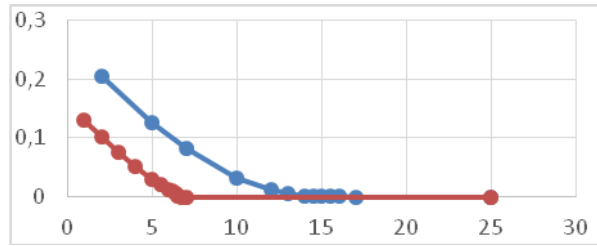


Рис. 4.20. График зависимости BER от SNR на LDPC кодере/декодере. Синяя линия – для QPSK, Красная линия – для 8-PSK

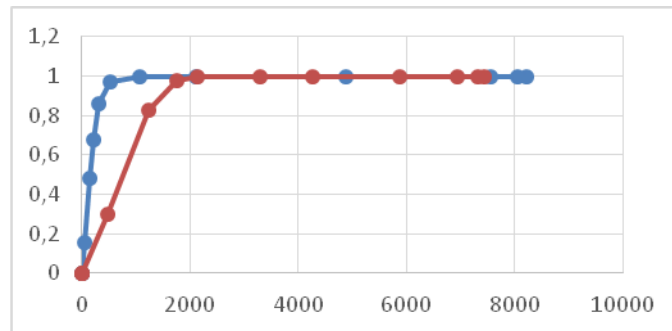


Рис. 4.21. График зависимости BER от контрольной суммы на входе/выходе системы. Синяя линия – для QPSK, Красная линия – для 8-PSK

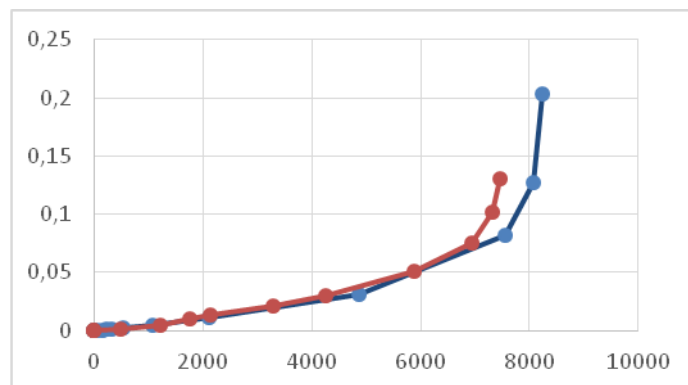


Рис. 4.22. График зависимости BER от контрольной суммы на LDPC кодере/декодере. Синяя линия – для QPSK, Красная линия – для 8-PSK

Результаты исследований модели Simulink линии "вверх" MF-TDMA при использовании двух входных последовательностей представлены на рисунке 5. По полученным данным построены зависимости BER от SNR для первой и второй последовательности.

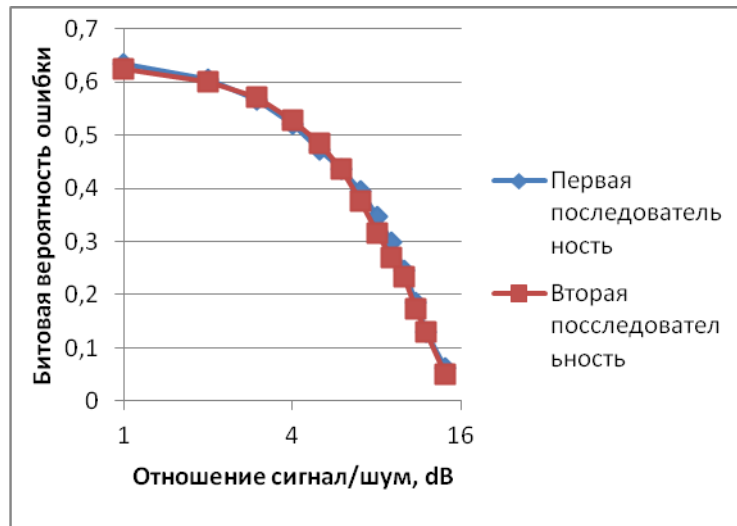
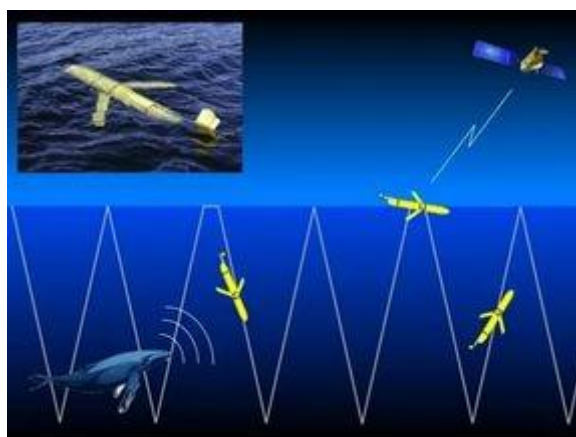
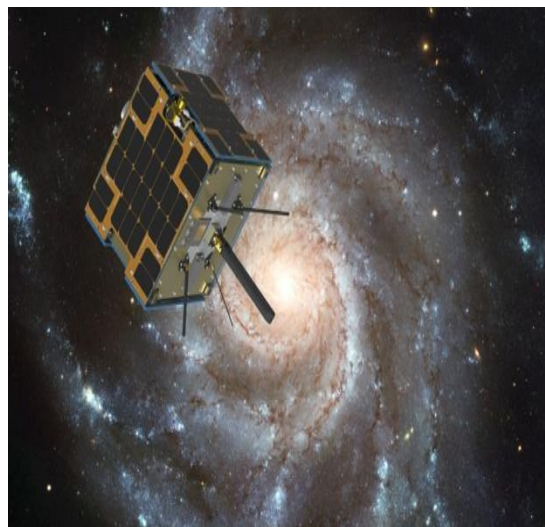
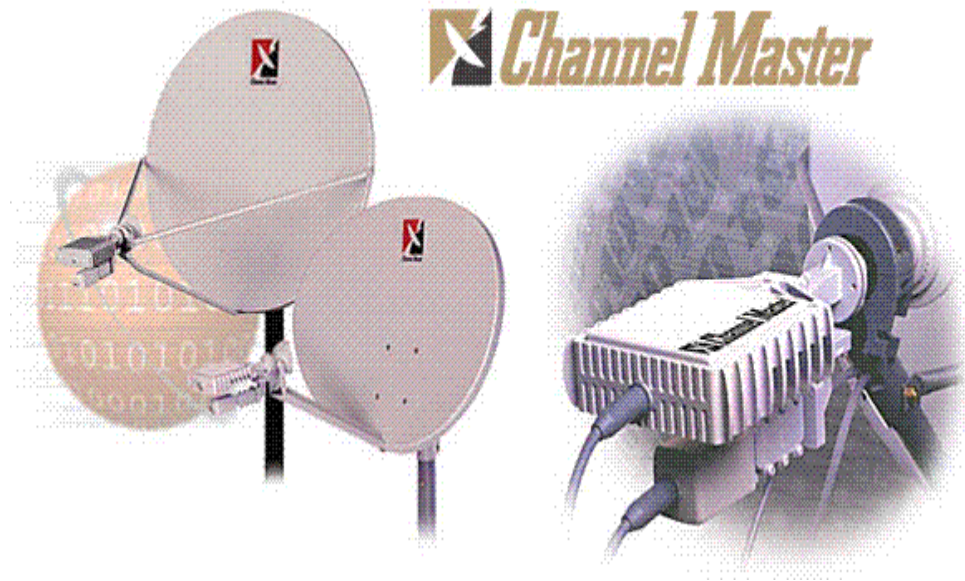


Рис. 4.23 Зависимость BER от SNR для двух последовательностей

В работе представлены основные результаты исследований модели спутниковой системы передачи данных на базе стандарта DVB-RCS.

### КОНСТРУКЦИЯ ПРИЕМО-ПЕРЕДАТЧИКОВ МКА





**БОРТОВОЙ ПЕРЕДАТЧИК МКА**





### **Широкополосная система спутниковой связи с использованием космических аппаратов на высотных эллиптических орбитах типа «Молния»**

«НордМедиаСтар» – новая проектируемая ССС на базе использования КА на ВЭО с обработкой сигналов на борту. Она создается как коммерчески самокупаемая структура, возвращающая первоначальные инвестиции из доходов от предоставления услуг пользователям со сроком окупаемости 3,5 года после ввода в коммерческую эксплуатацию.

«НордМедиаСтар» является дальнейшим развитием ССС «Глобсатком». Но если ССС "Глобсатком" ориентирована в основном на решение задач спутникового мониторинга (использование сети передачи данных для решения технологических задач) и лишь в небольшой степени – на предоставление других телекоммуникационных услуг (ТВ, РВ, телефония), то "НордМедиаСтар" – мощная полнофункциональная мультимедийная система, предоставляющая весь спектр современных телекоммуникационных услуг пользователям на стационарных и подвижных объектах.

Основные свойства ССС «НордМедиаСтар»:

1. Географические особенности Российской Федерации (большая протяженность в долготном направлении, северное расположение территорий, включая Полярный бассейн и акваторию Северного Ледовитого океана) требуют использования ССС с применением КА на ВЭО типа «Молния», обеспечивающих на всей обслуживаемой

территории высокие углы видимости КА с объектов связи (в пределах 45°-90°), что особенно важно при связи с подвижными объектами, а также со стационарными объектами, расположенными в районах со сложным рельефом местности.

2. Президентом страны в октябре 2008 г. одобрена подготовленная Правительством Концепция социально-экономического развития РФ до 2020 и до 2030 гг., где сделан акцент на освоение регионов РФ, расположенных в удаленных и труднодоступных районах со сложным рельефом местности. И в процессе освоения, и при работе новых предприятий, построенных в этих районах, ССС «НордМедиаСтар» будет играть весьма важную роль [2, 3].

3. Большое значение будет иметь ССС «НордМедиаСтар» при освоении и работе построенных многочисленных объектов связи в Северном Полярном бассейне (где спутники на ГСО не видны), а в Концепции социально-экономического развития РФ освоению этого региона уделено особое внимание.

4. Министерством транспорта РФ подготовлена транспортная стратегия на период до 2030 г., которая была рассмотрена и принята на заседании Правительства РФ в октябре 2008 г. В рамках этой стратегии, в частности, поставлена задача значительно увеличить транзитный (через Россию) транспортный обмен между Азией и Европой, который сейчас составляет около 1% общего транспортного обмена между Азией и Европой.

Ведущую роль в решении этой задачи могут сыграть и ССС «Глобсатком», и «НордМедиаСтар». Роль последней будет заключаться в предоставлении всего спектра мультимедийных услуг всем пассажирам и обслуживающему персоналу поездов на всем пути из Азии в Европу, что может стать важным фактором при привлечении людей из стран Азии и Европы к использованию этого транспортного коридора (в комфортных условиях, с обеспечением всего набора мультимедийных услуг).

5. Аналога ССС «НордМедиаСтар» нет пока ни в России, ни в других странах мира. Работающие с КА на ВЭО (типа «Молния») российские военные ССС предназначены для решения специальных задач и имеют пропускную способность намного ниже, чем ССС «НордМедиаСтар».

Система спутниковой связи «НордМедиаСтар» предназначена для построения сетей с предоставлением мультимедийных услуг (в частности, телефонии, передачи данных, телематических услуг, включая высокоскоростной доступ в Интернет, непосредственного многопрограммного цифрового телевизионного вещания, включая видео по запросу, непосредственного многопрограммного цифрового радиовещания) на подвижные и стационарные объекты на всей территории России, сопредельных государств и в Северном Полярном бассейне.



Основная особенность ССС – обеспечение высокой пропускной способности системы при обслуживании малогабаритных абонентских земных станций по тарифам соизмеримым (или меньшим) с тарифами у систем «Инмарсат», «Глобалстар» и «Турайя».

Потенциальными пользователями ССС являются: государственные пользователи, гражданские ведомства и министерства (МЧС, Минприроды, Росатом, Федеральная дорожная служба Минтранса и др.), а также силовые структуры (на коммерческой основе); коммерческие структуры - ОАО «РЖД», «РАО ЕЭС», компании - операторы связи, нефтяные и газовые компании, автотранспортные, судоходные и рыболовецкие, авиа-ционные компании, охранные структуры, теле- и радиовещатели и др.; частные лица - пассажиры междугородных автобусов, пассажирских поездов, речных и морских судов, авиапассажиры, жители поселков в отдаленных и труднодоступных районах.

Общие характеристики ССС «НордМедиаСтар» приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8 – Общие характеристики ССС «НордМедиаСтар»

Зона обслуживания	Территория РФ, сопредельных государств и Арктической зоны РФ
Тип орбиты	Высокоэллиптическая типа «Молния»
Количество КА	Четыре
Срок активного существования КА	10 лет
Ориентация КА	Трехосная
Масса КА, кг	2000
Энергопотребление полезной нагрузки, Вт	8000
Диапазоны частот	С – абонентские линии сетей теле- и радиовещания, доступа в Интернет, корпоративных мультисервисных сетей
	L – абонентские линии корпоративных мультисервисных сетей для VIP-пользователей
	Ku – фидерные линии и обмен ТВ и РВ программами

ССС включает в себя пять функционально независимых подсистем, объединенных в составе единого космического комплекса на ВЭО, и наземные средства управления и контроля (рисунок 4.24).

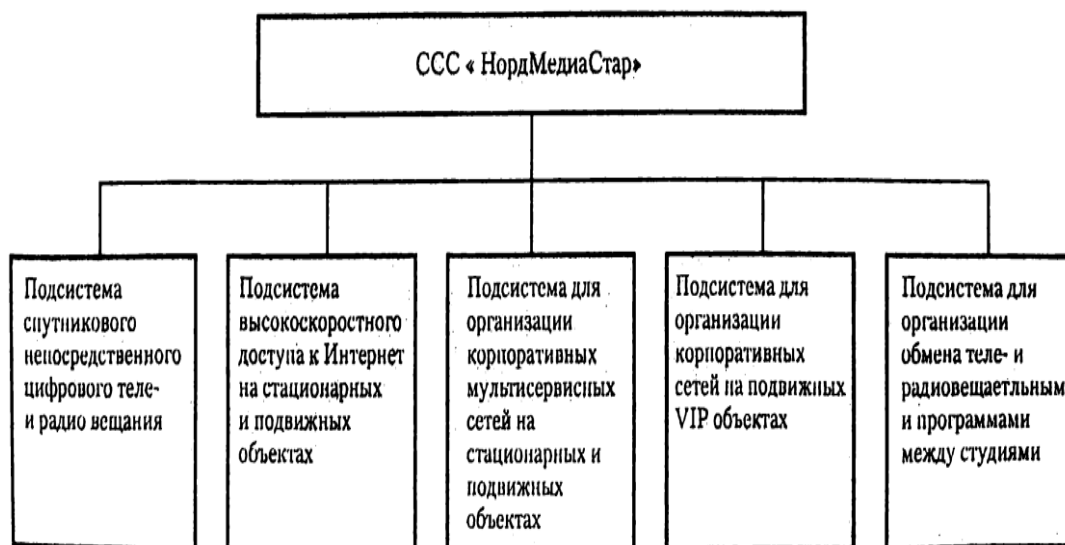


Рисунок 4.24. Функциональные подсистемы ССС «НордМедиаСтар»

Орбитальная группировка ССС «Глобсатком» включает в себя четыре синхронизированных КА на орбитах типа «Молния». Из них во включенном состоянии находится один, располагающийся вблизи апогея на основном витке над севером Западной Сибири. При полетах самолетов через Северный полюс может включаться и второй КА, находящийся на сопряженном витке с апогеем над Севером Канады. Орбита типа «Молния» показана на рисунке 2.2, а на рисунке 2.3 трасса орбиты.

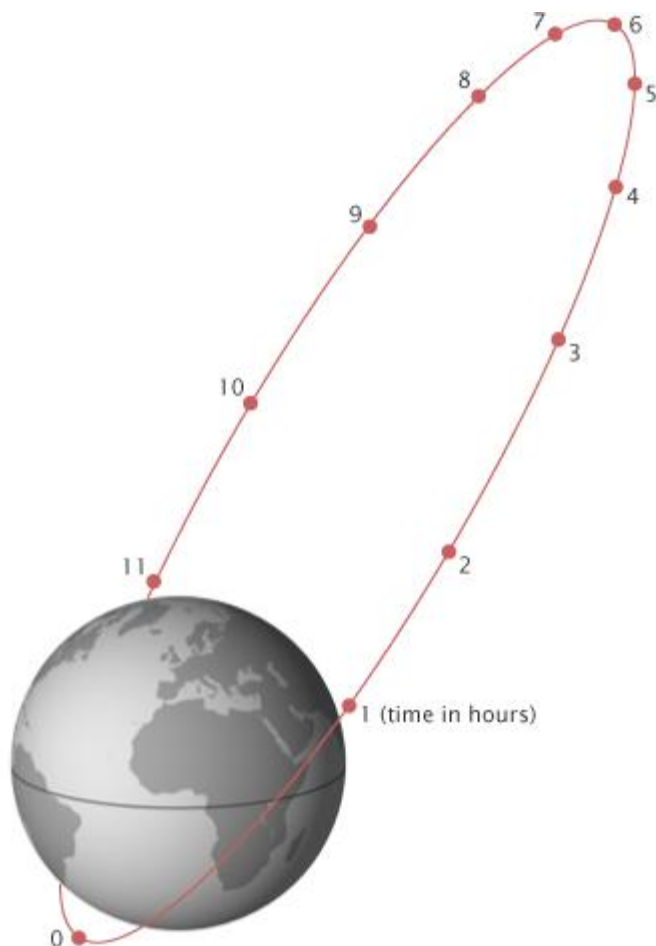


Рис. 4.25 – Орбита типа «Молния»



Рис. 4.26. Трасса орбиты типа «Молния»

Бортовой ретрансляционный комплекс обеспечивает работу в L (1,5/1/6 ГГц), С (6/4 ГГц) и Ku (14/11 ГГц) диапазонах. В состав БРТК входят приемный и передающие комплексы, антенно-фидерная система, аппаратура обработки сигналов, во многом определяющая особенности и преимущества РТР «НордМедиаСтар».

Краткие характеристики БРТК приведены в таблице 4.8, а упрощенная структурная схема показана на рисунке 4.27.

Таблица 4.8 – Краткие характеристики БРТК

Диапазоны частот	L, C, Ku
Количество стволов	<p>Передающие:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• четыре – в L-диапазоне (по 150 Вт, с полосой 0,7 МГц и с разномом между несущими 1 МГц);</li> <li>• 16 – в С-диапазоне (по 100 Вт, с полосой 40 МГц и с разномом между несущими 50 МГц);</li> <li>• 12 – в Ku-диапазоне (по 50 Вт, с полосой 40 МГц и с разномом между несущими 50 МГц) и четыре ствола по 100 Вт каждый с двумя полосами по 40 МГц с разномом между несущими 50 МГц</li> </ul> <p>Приемные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 16 – в L-диапазоне (по 0,7 МГц с разномом между несущими 1 МГц);</li> <li>• 16 – в С-диапазоне (по 40 МГц с разномом между несущими 50 МГц, в каждой полосе 40 МГц имеется четыре подствола по 7 МГц с разномом между несущими 10 МГц);</li> <li>• 20 – в Ku-диапазоне (по 40 МГц с разномом между несущими 50 МГц) и еще четыре ствола (с полосой по 0,7 МГц и с разномом между несущими 1 МГц)</li> </ul>
ЭИИМ	<p>в L-диапазоне 40 дБВт  в С-диапазоне 43 дБВт  в Ku-диапазоне 40 дБВт</p>
Добротность	<p>L-диапазон +5 дБ/К  С-диапазон +10 дБ/К  Ku-диапазон +10 дБ/К</p>

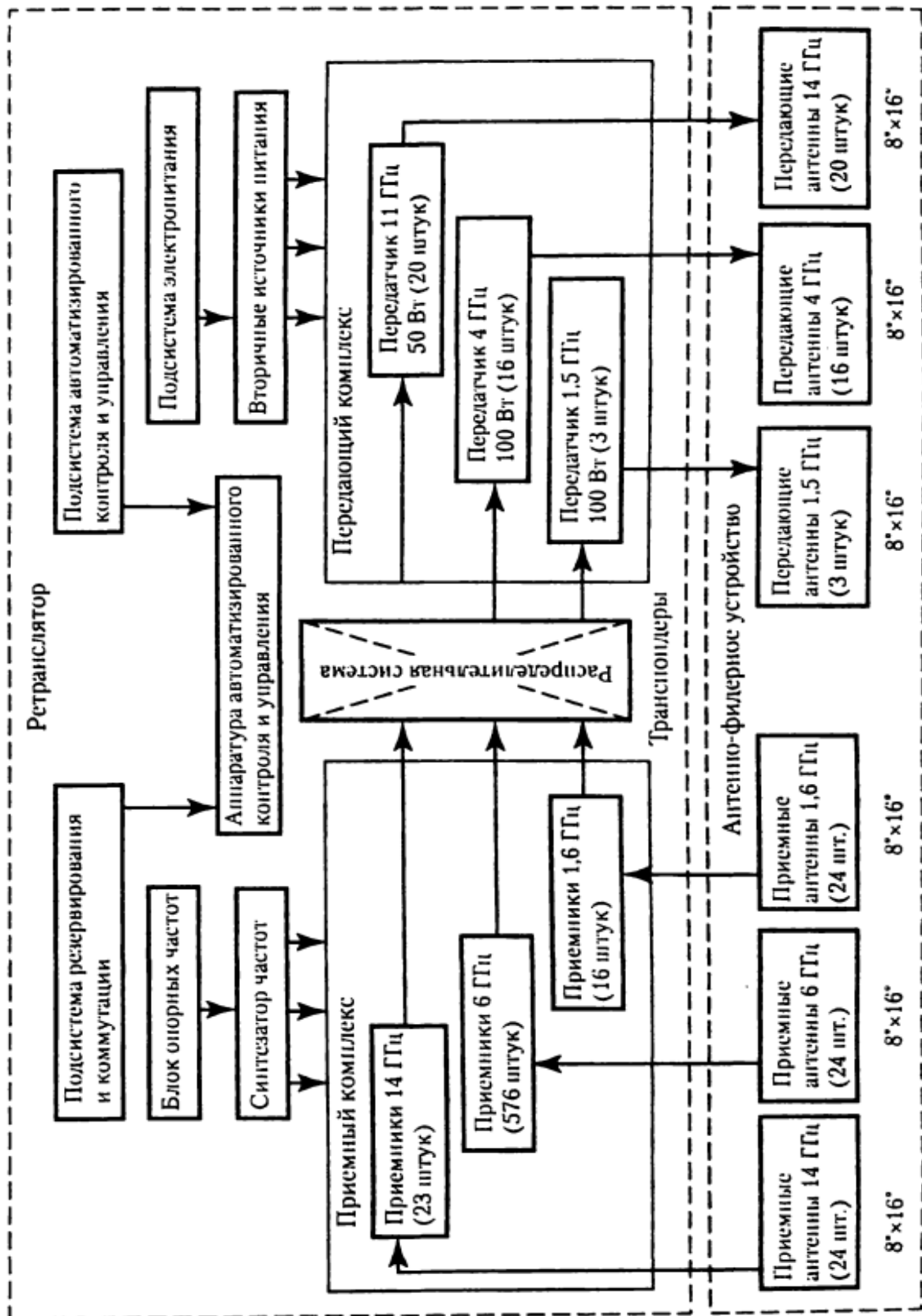


Рис. 4.27. Структурная схема ретранслятора «НордМедиаСтар»

Адаптивное когерентное сложение сигналов по приему на БРТК позволяет реализовать следующие приемные системы:

- L-диапазон – адаптивная приемная ФАР на 16 несущих с 24 ветвями пространственного разнесения на каждой несущей (КНД<32 дБ для каждого луча на своей несущей);

- С-диапазон – адаптивная приемная ФАР на 64 несущих с 24 (или 48) ветвями пространственного разнесения на каждой несущей (КНД<37 дБ, или 40 дБ для каждого луча на своей несущей);
- Ku-диапазон – адаптивная приемная ФАР на 24 несущих с 24 (или 96) ветвями пространственного разнесения на каждой несущей (КНД<37 дБ, или 43 дБ для каждого луча на своей несущей).

Приемные комплексы различных диапазонов построены по схожему принципу и имеют в своем составе специальный процессор адаптивного сложения и усиления разнесенных сигналов на базе так называемых «когераторов» [4], в таблице 4.9 отображена информация о составе реализации БРТК.

Таблица 4.9 – Состав реализаций БРТК

16 когераторов на 24 ветви разнесения	в L-диапазоне
64 когератора на 4 (или на 48) ветви разнесения	в С-диапазоне
24 когератора на 24 (или на 96) ветви разнесения	в Ku-диапазоне

Структурная схема приемного комплекса на примере С-диапазона приведена на рисунке 2.5. Организовано 64 частотных ствола шириной по 8 МГц с шагом через 10 МГц, входящих в 16 групп по четыре ствола каждая, занимающих полосы по 40 МГц с шагом через 50 МГц (всего 800 МГц). Земной сегмент ССС включает центр управления полетом (ЦУП), контрольно-измерительный комплекс (КИК), наземный комплекс технического обеспечения КА, центр управления связью (ЦУС) и ЗС различного назначения.

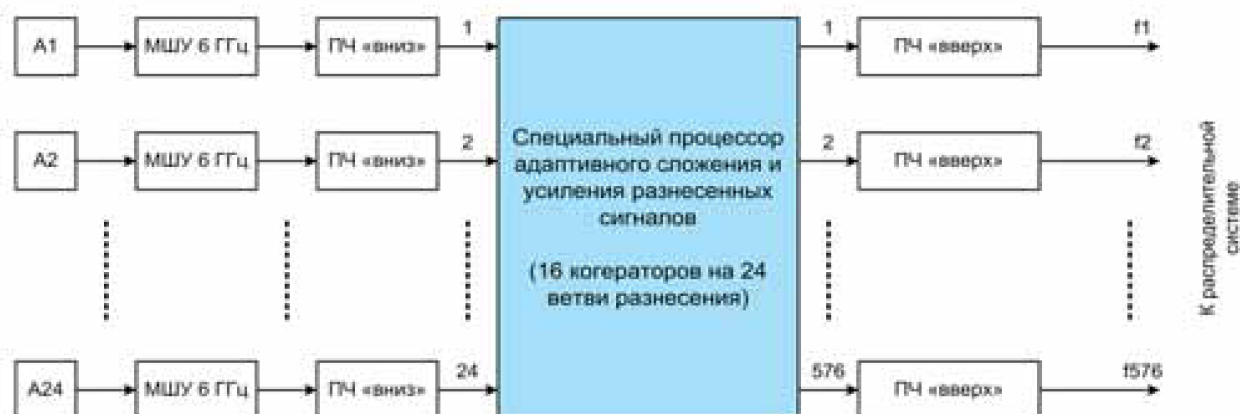


Рис. 4.28. Структурная схема приемного комплекса С-диапазона

Подсистема теле- и радиовещания предназначена для организации непосредственного многопрограммного цифрового теле- и радиовещания (в том числе интерактивного) преимущественно на большие стационарные и подвижные объекты. Два основных сегмента рынка:

- теле- и радиовещатели (СМИ) и распространители теле- и радиопрограмм (государственные и частные);
- телезрители и радиослушатели, расположенные на стационарных объектах (городские жилые дома, отели, коттеджные поселки), подвижных объектах (пассажирские авиалайнеры, пассажирские морские и речные суда, пассажирские железнодорожные поезда и т. п.).

Краткие характеристики подсистемы приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Краткие характеристики подсистемы теле- и радиовещания

Линия «вверх»	Ки-диапазон (14 ГГц, полоса 400 МГц) – подача программ на КА из центров формирования программ
	С-диапазон (6 ГГц, полоса 400 МГц) – запросы программ от пользователей на объектах
Линия «вниз»	С – диапазон (4 ГГц, полоса 400 МГц) – передача программ пользователям на объектах
	Ки-диапазон (11 ГГц, полоса 400 МГц) – доведение запросов программ от пользователей на центры подачи программ
Количество одновременно транслируемых ТВ-программ	200
Количество одновременно транслируемых РВ-программ	200
Способ многостанционного доступа	MF-TDMA
Количество программ на одной несущей	ТВ – 25, РВ – 25
Стандарт ТВ-вещания	DVB-S2/MPEG-4

В качестве абонентских ЗС используются малогабаритные, необслуживаемые, приемные ЗС, установленные на стационарных (жилые дома в районах РФ со сложным рельефом местности) или подвижных объектах (туристические автобусы, ж/д поезда, корабли, авиалайнеры). Приемные ЗС в диапазоне 4 ГГц имеют следующие характеристики:

- небольшой размер аппаратуры и относительно низкая стоимость;
- низкое электропотребление;
- радиочастотная часть на базе специализированных БИС;
- блок обработки приемных сигналов со спутника (MF-TDM/ QPSK) на базе специализированных БИС.

Три типа антенных систем для различных объектов установки:



- зеркальная антенна с размером раскрыва 0,5х2,0 м без системы слежения за КА на ВЭО – для стационарных объектов;
- зеркальная антенна с диаметром 1,2 м (программно-механически перенацеливаемая) – для подвижных объектов (поезд, морское или речное судно);
- плоская ФАР размером 60х480 см (для самолетов) или 130х130 см (для автобусов, речных и морских судов) с электронным наведением и слежением луча за КА на ВЭО (или по программе, или по принимаемому от КА сигналу).

Подсистема будет являться российским аналогом уже действующих сейчас систем Sirius, WorldSpace (КА AsiaStar, AfriStar и AmeriStar) [2].

Подсистема высокоскоростного доступа в Интернет предназначена для обслуживания пользователей, расположенных на стационарных и подвижных объектах связи, которым такие услуги не могут быть предоставлены традиционными методами. Два основных сегмента рынка: глобальные и локальные интернет-провайдеры; индивидуальные и коллективные пользователи сети Интернет, расположенные на стационарных объектах (офисы, промышленные предприятия, городские жилые дома, отели, коттеджные поселки), подвижных объектах (пассажирские авиалайнеры, пассажирские морские и речные суда, пассажирские железнодорожные поезда и т. п.).

Краткие характеристики подсистемы приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.11 – Краткие характеристики подсистемы высокоскоростного доступа в Интернет

Линия «вверх» (от абонентских приемопередающих станций)	С-диапазон (6 ГГц, полоса 100 МГц)
	L-диапазон (для самолетов) (1,6 ГГц, полоса 16 МГц)
Линия «вниз»:	С-диапазон (4 ГГц, полоса 300 МГц)
Фидерная линия	Ku-диапазон
Способ многостанционного доступа	MF-TDMA
Скорость передачи информации	В линиях «запросов» – 0,5/1,0 Мбит/с
	В линиях «ответов» – 41/54 Мбит/с
Пропускная способность (количество обслуживаемых объектов связи)	Стационарные – до 5–10 тыс.
	Подвижные – до 5–10 тыс.

В составе абонентских ЗС используется четыре типа антенных систем для различных объектов установки:

- зеркальная приемопередающая антенна размером 0,5x2,0 м без системы слежения за ИСЗ – для стационарных объектов;
- зеркальная приемопередающая антенна диаметром 1,2 м, с программным наведением луча на КА механически перенацеливаемая – для стационарных и некоторых видов подвижных объектов (поезда, речные и морские суда, междугородные автобусы);
- отдельные на прием и передачу ФАР размером (60x480 см или 130x130 см на прием в диапазоне 4 ГГц) и (40x40 см на передачу в диапазоне 1,6 ГГц) с электронным наведением и слежением луча за КА на ВЭО по программе – для подвижных объектов (в основном для самолетов).

Подсистема корпоративных мультисервисных сетей для стационарных и подвижных пользователей предназначена для обслуживания пользователей на той части объектов, на которых не может быть предоставлена комплексная услуга (голос + данные + телематика + видеоконференцсвязь) традиционными методами или через спутники на ГСО.

Основные сегменты рынка: глобальные и локальные операторы связи, предоставляющие мультимедийные услуги; глобальные и локальные корпоративные пользователи мультимедийных услуг, расположенные на стационарных объектах (офисы, промышленные предприятия, туристические фирмы, отели и т. д.), подвижных объектах (пассажирские авиалайнеры, пассажирские морские и речные суда, пассажирские железнодорожные поезда и т. п.).

Краткие характеристики подсистемы приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Краткие характеристики подсистемы корпоративных мультисервисных сетей для стационарных и подвижных пользователей

Линия «вверх» (от абонентских приемопередающих станций)	С-диапазон (6 ГГц, полоса 300 МГц)
	Л-диапазон (для самолетов) (1,6 ГГц, полоса 16 МГц)
Линия «вниз»	С-диапазон (4 ГГц, полоса 100 МГц)
Фидерная линия	Ки-диапазон
Способ многостанционного доступа	MF-TDMA
Скорость передачи информации	«Центр → периферия» – 41/54 Мбит/с
	«Периферия → Центр» – 6/8 Мбит/с
Пропускная способность (количество обслуживаемых объектов связи)	Стационарные – до 5–10 тыс.
	Подвижные – до 5–10 тыс.



Абонентские ЗС аналогичны ЗС подсистемы доступа в Интернет.

Подсистема корпоративных мультисервисных сетей для *VIP*-пользователей на подвижных объектах предназначена для организации закрытых корпоративных мультисервисных сетей в интересах *VIP*-пользователей на подвижных объектах с предоставлением всего набора телекоммуникационных услуг (закрытые телефония, данные, видеоконференцсвязь, телематика) сравнительно небольшому количеству этих пользователей, находящихся во всей зоне действия подсистемы.

В число обслуживаемых данной подсистемой *VIP*-объектов могут быть также включены малогабаритные перевозимые узлы связи, оперативно развертываемые в местах стихийных бедствий (МЧС), в местах отдыха *VIP*-пользователей, когда они расположены в отдаленных и труднодоступных районах РФ.

Подсистема обмена теле- и радиовещательными программами предназначена для обеспечения информационного взаимодействия между центрами подачи программ в реальном масштабе времени или по запросу территориально разнесенных региональных ТВ и/или РВ студий, продюсерских центров, формирователей медийного контента.

*Kи*-диапазон, количество одновременно транслируемых программ – 100 ТВ и 100 РВ. Используются стандартные приемопередающие ЗС.

Уникальность проекта «НордМедиаСтар» состоит в следующем:

1. Связь на всей без исключения территории России, включая самые западные и восточные регионы и Арктическую зону и районы РФ со сложным рельефом местности.
2. Предоставление услуг связи в движении.
3. Обеспечение массового доступа к услугам системы за счет использования недорогих портативных мобильных абонентских терминалов.
4. Предоставление простого доступа к мультимедийному контенту.
5. Высокая пропускная способность системы за счет использования перспективных технологий.

В составе абонентских ЗС используются отдельные на прием и на передачу антенны (на передачу – ФАР 40x40 см, скомпонованная из 16 элементов и управляемая по программе; на прием - адаптивная ФАР 40x40 см, скомпонованная из 16 элементов и управляемая по программе) или дуплексная ФАР.

В ССС «НордМедиаСтар» внедрены следующие ключевые технологии:

- высокие наклонные эллиптические орбиты с периодом обращения 12 часов (орбита типа «Молния»), что позволяет обеспечить высокие углы видимости КА с ЗС (>60° на большей части территории РФ);

- в составе КА БРТК – большое количество простых в изготовлении и имеющих малые габариты и массу плоских синфазных ФАР, применяемых для компоновки на КА антенных систем с большой эффективной площадью;
- в приемных трактах ФАР - устройства когерентного с весом сложения на большое количество ветвей пространственного разнесения, что обеспечивает резкое повышение энергетического потенциала радиолиний и устраняет «межлучевые» провалы, имеющиеся у обычных МЛА;
- в антеннах на ЗС и КА – плоские приемные и излучающие элементы, что позволяет реализовать новый и более рациональный принцип компоновки КА и ЗС.

При необходимости ССС «НордМедиаСтар» может быть использована и силовыми ведомствами РФ (как в обычный, так и в особый период). В особый период будут особо востребованы адаптивные ФАР на КА, а также используемые в ССС сигналы и методы многостанционного доступа для повышения помехозащищенности линий связи, в том числе:

- формирование «нулей» диаграммы направленности бортовых антенн КА на источники организованных помех;
- организация режимов ППРЧ (псевдослучайная перестройка рабочей частоты) и ШПС (шумоподобные сигналы).

#### **4.4. Система связи для сети наноспутников CubeSat 3u на базе стандарта IEEE 802.16m с использованием технологии ПЛИС**

CubeSat — формат малых искусственных спутников Земли для исследования космоса, имеющих малый вес и размеры. Наноспутники имеют массу от 1 до 10 кг.

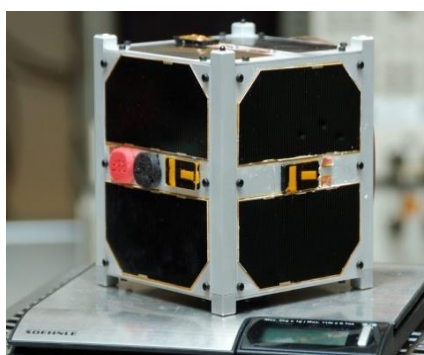


Рис. 4.29 – CubeSat 1U

Система межспутниковой связи для "роя" CubeSat построена на базе стандарта IEEE 802.16m (Mesh-сети). Стандарт IEEE 802.16m обеспечивает передачу данных со скоростью от 150 Мбит/сек до 600 Мбит/сек, на частотах от 1,5 до 11 ГГц, на расстояние 200-350 км.

Для реализации CubeSat на WiMAX 2 нужно учитывать размеры передатчика и наноспутника. Спутник имеет размеры 10x10x30 (3U) и массой до 6 кг. Условие открытого космоса, то есть перепады температуры (-50.+50 °С) и условие излучения.

Использование ПЛИС для спутников представляет интерес, поскольку с их применением, можно реализовывать сложные схемы обработки данных. Спутник построен на основе множества программируемых интегральных схем, каждая из которых отвечает за ряд своих задач: процессорная плата, навигационная плата, плата радиолинии, плата питания, плата управления полезной нагрузкой (например фотокамера) и плата для взаимодействий всех плат друг с другом, что можно увидеть на рисунке 4.50.

Платы обеспечивают работу электроники, обработку данных с различных датчиков, хранение и передачу данных, с их привязкой к системе координат и времени. Основу каждого модуля составляет микроконтроллер с установленной операционной системой, взаимодействие между модулями осуществляется по интерфейсу CAN [1].



Рис. 4.50. Компановка CubeSat 1U

Структурная схема модема для реализации на ПЛИС представлена на рисунке 3, на котором приемная и передающая часть рассматривается отдельно.

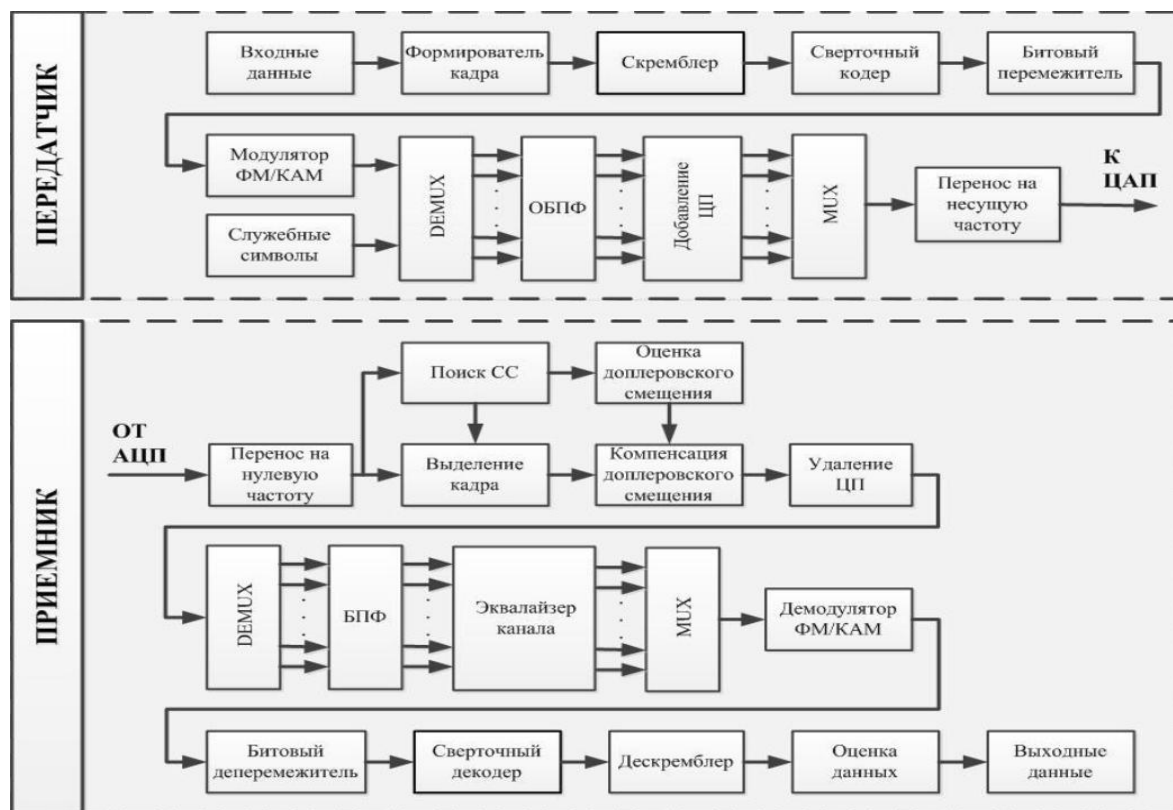


Рис. 4.51. Структурная схема модема для реализации на ПЛИС

В передаче входные данные в виде непрерывного битового потока поступают в формирователь кадра, где к каждому кадру добавляется служебная информация, в том числе циклически избыточный код (CRC) для последующего контроля целостности принятых данных. После чего кадр передается в блок скремблера, предназначенный для обеспечения защиты информации от несанкционированного доступа. Далее информация поступает в блок сверточного кодирования с изменяемой скоростью кода в зависимости от помеховой обстановки. Битовый перемежитель переставляет биты по псевдослучайному закону для борьбы с пакетированием ошибок при импульсных помехах и замираниях в канале связи. В блоке модулятора ФМ/КАМ формируются символы квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) или 16-позиционной квадратурной амплитудной манипуляции (QAM-16). Информационные символы дополняются пилотными и нулевыми символами для последующей оценки канала и расчета доплеровского смещения на приемной стороне. В блоке ОБПФ производится обратное БПФ для переноса сигнала во временную область. Конец символа OFDM записывается в его начало для создания защитного циклического префикса (ЦП). Далее производится мультиплексирование данных и перенос на несущую частоту. Сформированные данные передаются на последовательно включенные цифро-

аналоговый преобразователь (ЦАП), усилитель мощности и антенну (на рисунке не отображены) [2].

Предложенная в работе система связи для CubeSat позволит создать Mesh-сеть для "роя" наноспутников как между спутниками на расстоянии 200 км, так и связи наноспутников с Землей на удалении от Земли до 350 км обеспечит передачу данных со скоростью от 150 Мбит/сек до 600 Мбит/сек.

## 5. КОМПЬЮТЕРНЫЙ И ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СИСТЕМОТЕХНИКЕ

### 5.1. Проектирование защищенной системы мобильной связи стандарта GSM

GSM относится к сетям второго поколения (2 Generation) (1G — аналоговая сотовая связь, 2G — цифровая сотовая связь, 3G — широкополосная цифровая сотовая связь, коммутируемая многоцелевыми компьютерными сетями, в том числе Интернет).

Мобильные телефоны выпускаются с поддержкой 4 частот: 850 МГц, 900 МГц, 1800 МГц, 1900 МГц.

В зависимости от количества диапазонов, телефоны подразделяются на классы и вариацию частот в зависимости от региона использования.

- Однодиапазонные — телефон может работать в одной полосе частот. В настоящее время не выпускаются, но существует возможность ручного выбора определённого диапазона частот в некоторых моделях телефонов, например Motorola C115, или с помощью инженерного меню телефона.

- Двухдиапазонные (Dual Band) — для Европы, Азии, Африки, Австралии 900/1800 и 850/1900 для Америки и Канады.

- Трёхдиапазонные (Tri Band) — для Европы, Азии, Африки, Австралии 900/1800/1900 и 850/1800/1900 для Америки и Канады.

- Четырёхдиапазонные (Quad Band) — поддерживают все диапазоны 850/900/1800/1900.

В стандарте GSM применяется GMSK-модуляция с величиной нормированной полосы  $BT = 0,3$ , где  $B$  — ширина полосы фильтра по уровню минус 3 дБ,  $T$  — длительность одного бита цифрового сообщения.

GSM на сегодняшний день является наиболее распространённым стандартом связи. По данным ассоциации GSM (GSMA) на данный стандарт приходится 82 % мирового рынка мобильной связи, 29 % населения земного шара использует глобальные технологии GSM. В GSMA в настоящее время входят операторы более чем 210 стран и территорий.

#### История развития

GSM сначала означало *Groupe Spécial Mobile*, по названию группы анализа, которая создавала стандарт. Теперь он известен как *Global System for Mobile Communications* (Глобальная Система для Мобильной Связи), хотя слово «Связь» не включается в сокращение. Разработка GSM началась в 1982 году группой из 26 Европейских национальных телефонных компаний. *Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных администраций* (CEPT), стремилась построить единую для всех европейских стран сотовую систему диапазона 900 МГц. Достижения

GSM стали «одними из наиболее убедительных демонстраций какое сотрудничество в Европейской промышленности может быть достигнуто на глобальном рынке».

В 1989 году *Европейский Телекоммуникационный Институт Стандартов* (ETSI) взял ответственность за дальнейшее развитие GSM. В 1990 году были опубликованы первые рекомендации. Спецификация была опубликована в 1991 году.

Коммерческие сети GSM начали действовать в Европейских странах в середине 1991 г. GSM разработан позже, чем аналоговая сотовая связь и во многих отношениях была лучше спроектирована. Северо-Американский аналог — PCS, вырос из своих корней стандарты включая цифровые технологии TDMA и CDMA, но для CDMA потенциальное улучшение качества обслуживания так и не было никогда подтверждено.

### **GSM Phase 1**

1982 (Groupe Spécial Mobile) — 1990 г. Global System for Mobile Communications. Первая коммерческая сеть в январе 1992 г. Цифровой стандарт, поддерживает скорость передачи данных до 9,6 кбит/с. Полностью устарел, производство оборудования под него прекращено.

В 1991 году были введены услуги стандарта GSM «ФАЗА 1».

В них входят:

- Переадресация вызова (Call forwarding). Возможность перевода входящих звонков на другой телефонный номер в тех случаях, когда номер занят или абонент не отвечает; когда телефон выключен или находится вне зоны действия сети и т. п. Кроме того, возможна переадресация факсов и данных.
- Запрет вызова (Call barring). Запрет на все входящие/исходящие звонки; запрет на исходящие международные звонки; запрет на входящие звонки, за исключением внутрисетевых.
- Ожидание вызова (Call waiting). Эта услуга позволяет принять входящий вызов во время уже продолжающегося разговора. При этом первый абонент или по-прежнему будет находиться на связи, или разговор с ним может быть завершён.
- Удержание вызова (Call Holding). Эта услуга позволяет, не разрывая связь с одним абонентом, позвонить (или ответить на входящий звонок) другому абоненту.
- Глобальный роуминг (Global roaming). При посещении любой из стран, с которой ваш оператор подписал соответствующее соглашение, вы можете пользоваться своим сотовым телефоном GSM без изменения номера.

### **GSM Phase 2**

Стандарт GSM Phase 2 принят в 1993 г.<sup>[3]</sup> Цифровой стандарт, поддерживает скорость передачи данных до 9,6 кбит/с. С 1995 г. включает диапазон 1900 МГц.

Второй этап развития GSM — GSM «Фаза 2», который завершился в 1997 г., предусматривает такие услуги:

- Определение номера вызывающей линии (Calling Line Identification Presentation). При входящем звонке на экране высвечивается номер вызывающего абонента.
- Антиопределитель номера (Calling Line Identification Restriction). С помощью этой услуги можно запретить определение собственного номера при соединении с другим абонентом.
- Групповой вызов (Multi party). Режим телеконференции или конференц-связи позволяет объединить до пяти абонентов в группу и вести переговоры между всеми членами группы одновременно.
- Создание закрытой группы до десяти абонентов (Closed User Group). Позволяет создавать группу пользователей, члены которой могут связываться только между собой. Чаще всего к этой услуге прибегают компании, предоставляющие терминалы своим служащим для работы.
- Информация о стоимости разговора. Сюда входят таймер, который считает время на линии, и счётчик звонков. Также благодаря этой услуге можно проверять оставшийся на счёте кредит. Возможна и другая услуга: «Совет по оплате» (Advice of Charge). По требованию пользователя происходит проверка стоимости и длительности разговора в то время, когда аппарат находится на связи.
- Обслуживание дополнительной линии (Alternative Line Service). Пользователь может приобрести два номера, которые будут приписаны к одному модулю SIM. В этом случае связь выполняется по двум линиям, с предоставлением двух счетов, двух голосовых ящиков и т. п.
- Короткие текстовые сообщения (Short Message Service). Возможность приёма и передачи коротких текстовых сообщений (до 160 знаков).
- Система голосовых сообщений (Voice Mail). Услуга позволяет автоматически переводить входящие звонки на персональный автоответчик (голосовая почта). Пользоваться этим можно только в том случае, если у абонента активизирована услуга «переадресация вызовов».

Стандарт GSM Phase 2 считается устаревшим; но так как стандарт GSM подразумевает обратную совместимость, то старое оборудование базовых станций и телефоны могут работать (и работают) в современных сетях.

### **GSM Phase 2+**

Следующий этап развития сетей стандарта GSM «ФАЗА 2+» не связан с конкретным годом внедрения. Новые услуги и функции стандартизируются и внедряются после подготовки и утверждения их технических описаний. Все работы по



этапу «Фаза 2+» проводились *Европейским институтом стандартизации электросвязи* (ETSI). Количество уже внедрённых и находящихся в стадии утверждения услуг превышает 50. Среди них можно выделить следующие:

- улучшенное программное обеспечение SIM-карты;
- улучшенное полноскоростное кодирование речи EFR (Enhanced Full Rate);
- возможность взаимодействия между системами GSM и DECT;
- повышение скорости передачи данных благодаря пакетной передаче данных GPRS (General Packet RadioService) или за счёт системы передачи данных по коммутируемым каналам HSCSD (High Speed Circuit Switched Data).

### **Стандарты и радиointерфейс**

Стандарты GSM создаются и публикуются Европейским институтом телекоммуникационных стандартов. Документы обозначаются GSM nn.nn, например широко известен стандарт на GSM SIM-карточки GSM 11.11.

На сегодняшний день разработано множество различных стандартов сотовой связи. Существенная часть из них уже и морально, и физически устарела, часть не нашла распространения, а другие, напротив, распространились по всему миру и нашли сотни миллионов пользователей. Вот список самых распространенных стандартов:

- \* AMPS
- \* DAMPS
- \* NMT-450
- \* GSM 900,1800,1900
- \* CDMA
- \*DECT

Наибольшее распространение, благодаря отличным функциональным возможностям (передача SMS, MMS, EMS, факсов, возможность доступа в интернет по GPRS, система GPS и т.д.), нашли полностью цифровые стандарты GSM и CDMA.

### **GSM-900**

Цифровой стандарт мобильной связи в диапазоне частот от 890 до 915 МГц (от телефона к базовой станции) и от 935 до 960 МГц (от базовой станции к телефону). Количество *реальных* каналов связи гораздо больше чем написано выше в таблице, т.к. присутствует еще и временное разделение каналов TDMA, т.е. на одной и той же частоте могут работать несколько абонентов с разделением во времени.

В некоторых странах диапазон частот GSM-900 был расширен до 880—915 МГц (MS -> BTS) и 925—960 МГц (MS <- BTS), благодаря чему максимальное количество каналов связи увеличилось на 50. Такая модификация была названа **E-GSM** (extended GSM).

## **GSM-1800**

Модификация стандарта GSM-900, цифровой стандарт мобильной связи в диапазоне частот от 1710 до 1880 МГц.

Особенности:

- Максимальная излучаемая мощность мобильных телефонов стандарта GSM-1800 — 1 Вт, для сравнения у GSM-900 — 2 Вт. Больше время непрерывной работы без подзарядки аккумулятора и снижение уровня радиоизлучения.
- Высокая ёмкость сети, что важно для крупных городов.
- Возможность использования телефонных аппаратов, работающих в стандартах GSM-900 и GSM-1800, одновременно. Такой аппарат функционирует в сети GSM-900, но, попадая в зону GSM-1800, переключается — вручную или автоматически. Это позволяет оператору рациональнее использовать частотный ресурс, а клиентам — экономить деньги за счёт низких тарифов. В обеих сетях абонент пользуется одним номером. Но использование аппарата в двух сетях возможно только в тех случаях, когда эти сети принадлежат одной компании, или между компаниями, работающими в разных диапазонах, заключено соглашение о роуминге.

Сеть GSM 900-1800 — это единая сеть, с общей структурой, логикой и мониторингом в которой телефон никуда не переключается. Вручную можно только запретить использовать один из диапазонов в тестовых или очень старых аппаратах.

Проблема состоит в том, что зона охвата для каждой базовой станции значительно меньше, чем в стандартах GSM-900, AMPS/DAMPS-800, NMT-450. Необходимо большее число базовых станций. Чем выше частота излучения, тем хуже проникающая способность радиоволн в городской застройке.

Дальность связи в GSM лимитирована задержкой сигнала Timing advance и составляет до 35 км. При использовании режима extended cell возрастает до 75 км. Практически достижимо только в море, пустыне и горах.

## **CDMA**

Тип стандарта: цифровой

Полоса частот: 1,23 МГц

Статус: Активно эксплуатируется

Краткое описание: Технология CDMA (система множественного доступа с кодовым разделением) изначально разработана для военных целей США, но, благодаря отличным показателям, нашла после модернизации широкое применение и в гражданской связи.

Особенности:

\* Сигнал каждого абонента модулируется псевдослучайным, уникальным кодом (шумоподобным сигналом, отправляемым клиенту в начале разговора). Несущая частота сигнала меняется, согласно этому случайному правилу, в результате чего узкополосный информационный сигнал каждого пользователя расширяется во всю ширину частотного спектра (1,23 МГц в случае CDMA). В приемнике сигнал демодулируется с помощью идентичного кода, в результате чего восстанавливается изначальный сигнал. Но в то же время сигналы остальных пользователей для данного приемника продолжают оставаться расширенными и воспринимаются им лишь как шум, незначительно мешающий нормальной работе приемника.

\* Отличные показатели шумоустойчивости, как следствие - снижение стоимости развертывания CDMA-сетей.

\* Высокое качество передачи речи при низких показателях излучаемой мощности.

\* Большая, по сравнению с GSM, емкость сети.

\* Высокое качество связи в зданиях.

### **NMT-450**

Тип стандарта: аналоговый

Частотный диапазон: 453-468 МГц

Статус: устарел и морально, и физически

Краткое описание: NMT-450 (Nordic Mobile Telephone) разработан скандинавскими учеными. Первые сотовые сети в России строились именно на базе этого стандарта - федеральная сеть "СОТЕЛ" работала именно на NMT.

Особенности:

\* Большая площадь покрытия одним ретранслятором, а значит, меньшие затраты на организацию сети.

\* Малое затухание сигнала на открытом пространстве, что для России с ее плотностью заселения - огромный плюс.

\* Сигнал ретранслятора может добивать на 100 километров!

\* Благодаря тому, что стандарт - аналоговый, обеспечивается более высокое качество передачи речи - отсутствует грубая дискретизация голосовых отсчетов.

\* Плохая помехоустойчивость из-за используемых частот. Уровень промышленных помех в этом диапазоне значительно выше, чем, скажем, на 800, 900 и 1800 МГц.

\* Отсутствие секретности разговоров - их можно слушать УКВ-приемником.

\* Низкая емкость сетей, что не позволяет массово использовать стандарт в крупных городах.

\* Список дополнительных услуг издевательски пуст.

\* NMT-трубки весят в несколько раз больше своих цифровых собратьев и крайне расточительны в плане электроэнергии и здоровья владельца.

### **AMPS**

Тип стандарта: аналоговый

Частотный диапазон: 825-890 МГц

Статус: устарел и морально, и физически

Краткое описание: В конце восьмидесятых американские специалисты разработали специально для своей страны стандарт AMPS (Advanced Mobile Phone Service - усовершенствованная мобильная телефонная система). Завоевав популярность в других странах, в 1993 стандарт пришел в Россию. Такие сети по сей день эксплуатируются в 55 регионах, часть из них работает в аналоговом стандарте AMPS, часть - в усовершенствованном цифровом D-AMPS.

Особенности:

\* Более высокая, чем у NMT-450, емкость сетей.

\* Низкий уровень промышленных и атмосферных помех благодаря используемому частотному диапазону.

\* Более надежная, чем у NMT-450, связь в помещениях.

\* Меньшая зона устойчивой связи для одной базовой станции, что вынуждает операторов ставить их ближе друг к другу - большие затраты.

\* Почти не распространен в Европе и Азии.

AMPS уже давным-давно морально устарел, и в 1990 г. в США был разработан D-AMPS.

### **D-AMPS**

Тип стандарта: цифровой

Частотный диапазон: 825-890 МГц

Статус: устарел морально

Краткое описание: Когда AMPS морально устарел - а это произошло довольно быстро, в 1990 году - в Штатах был разработан D-AMPS.

Особенности:

\* Емкость сетей на несколько порядков выше, чем у NMT-450 и AMPS.

\* Возможность эксплуатации мобильных аппаратов как в цифровом, так и в аналоговом режимах.

\* Расширенный спектр дополнительных услуг.

\* Емкость DAMPS-сетей ниже, чем в полностью цифровых системах, но выше, чем в аналоговых.

### **GPRS**

Главным недостатком стандарта GSM на сегодня является низкая скорость передачи данных - максимум 9,6 Кбит/с, да и сам процесс реализован довольно убого - под данные выделяется один голосовой канал; оплата услуги, соответственно, осуществляется исходя из времени соединения, причем по тарифам, весьма схожим с речевыми. Для решения этой проблемы и был разработан стандарт передачи данных GPRS (General Packet Radio Service - услуга пакетной передачи данных по радиоканалу).

Новая система предложила пользователям мобильной связи уже совсем другие условия - максимальная скорость соединения составляет 171,2 Кбит/с, а оплата осуществляется исходя из количества реально переданной информации, трафика.

В GSM-сетях, оборудованных GPRS-модулями, более рационально распределяется радиочастотный ресурс. Не вдаваясь в сложные технические детали, можно сказать, что выигрыш в скорости достигается за счет одновременного использования для передачи данных нескольких свободных в настоящий момент каналов. Тут следует отметить, что скорость передачи информации определяется не столько теоретическими возможностями сетевого и абонентского оборудования, сколько загрузкой сети - так, из собственного опыта могу сказать, что скорость соединения в России в ближайшие несколько лет у тебя не превысит 5-6 Кбит/с.

Благодаря тому, что пакеты данных имеют значительно меньший приоритет, по сравнению с голосовой информацией, внедрение систем GPRS не приводит к ухудшению качества услуг передачи речи.

Система GPRS состоит из двух основных модулей: SGSN (Serving GPRS Support Node - узел поддержки GPRS) и GGSN (Gateway GPRS Support Node - шлюзовой узел GPRS). В некотором смысле SGSN можно назвать аналогом коммутатора сети GSM. SGSN обеспечивает доставку пакетов информации пользователям, взаимодействует с реестром абонентов, проверяет, разрешены ли запрашиваемые услуги, ведет мониторинг пользователей, организует регистрацию вновь прибывших абонентов и т.п.

Назначение GGSN легко понять из расшифровки названия - это шлюз между сотовой сетью (вернее, SGSN) и внешними информационными сетями (интернетом, провайдерскими Intranet-сетями и т.д.).

Основной задачей GGSN, таким образом, является маршрутизация (обычно совмещенная с NAT'ом) пакетов, генерируемых абонентом через SGSN. Вторичными функциями GGSN являются: динамическая выдача IP-адресов (а-ля DHCP-сервер :)), отслеживание информации о внешних сетях, подсчет трафика, тарификация и т.д.

Благодаря хорошей масштабируемости системы GPRS, оператор может увеличивать число SGSN и GGSN по мере роста числа пользователей и их суммарного трафика.

Как известно, для работы с GPRS необходимо иметь специальный телефон, поддерживающий эту технологию.

Основная характеристика такого телефона - так называемый класс GPRS. Это максимальное количество каналов, которое может задействовать аппарат для передачи данных - напомним, что один канал обеспечивает передачу данных со скоростью до 13,4 Кбит/с.

Самым первым производителем телефонов с GPRS стала французская фирма Sagem - на проходящей в Женеве выставке Telecom'99 она представила телефон Sagem MC-850, имеющий 3 канала на прием и 1 на передачу данных.

Современные телефоны способны использовать десять и более каналов для передачи данных, что, теоретически, обеспечивает отличную скорость соединения - до 20 килобайт в секунду.

В стандарте GSM определены 4 диапазона работы (ещё есть пятый):

#### **900/1800 МГц (используется в Европе, Азии)**

<b>Характеристики</b>	<b>GSM-900</b>	<b>GSM-1800</b>
Частоты передачи MS и приёма BTS (uplink), МГц	890 — 915	1710 — 1785
Частоты приёма MS и передачи BTS (downlink), МГц	935 — 960	1805 — 1880
Дуплексный разнос частот приёма и передачи, МГц	45	95
Количество <b>частотных</b> каналов связи с шириной 1 канала связи в 200 кГц	124	374
Ширина полосы канала связи, кГц	200	200

#### **850/1900 МГц (используется в США, Канаде, отдельных странах Латинской Америки и Африки)**

<b>Характеристики</b>	<b>GSM-850</b>	<b>GSM-1900</b>
-----------------------	----------------	-----------------

Частоты передачи MS и приёма BTS, МГц	824 — 849	1850 — 1910
Частоты приёма MS и передачи BTS, МГц	869 — 894	1930 — 1990
Дуплексный разнос частот приёма и передачи, МГц	45	80

## Структура GSM

Система GSM состоит из трёх основных подсистем:

- подсистема базовых станций (BSS — Base Station Subsystem),
- подсистема коммутации (NSS — Network Switching Subsystem),
- центр технического обслуживания (OMC — Operation and Maintenance Centre).

В отдельный класс оборудования GSM выделены терминальные устройства — подвижные станции (MS — Mobile Station), также известные как мобильные (сотовые) телефоны.

### Подсистема базовых станций



Рис.5.1. Антенны трех базовых станций на мачте

BSS состоит из собственно базовых станций (BTS — Base Transceiver Station) и контроллеров базовых станций (BSC — Base Station Controller). Область, покрываемая сетью GSM, разбита на условные шестиугольники, называемые *сотами* или *ячейками*. Диаметр каждой шестиугольной ячейки может быть разным — от 400 м до 50 км. Максимальный теоретический радиус ячейки составляет 120 км, что обусловлено ограниченной возможностью системы синхронизации к компенсации времени задержки сигнала. Каждая ячейка покрывается находящейся в её центре одной базовой станцией, при этом ячейки частично перекрывают друг друга, тем самым сохраняется возможность передачи обслуживания без разрыва соединения при перемещении абонента из одной соты в другую. Естественно, что на самом деле сигнал от каждой

станции распространяется, покрывая площадь в виде круга, а не шестиугольника, последний же является лишь упрощением представления зоны покрытия. Каждая базовая станция имеет шесть соседних в связи с тем, что в задачи планирования размещения станций входила минимизация стоимости системы. Меньшее количество соседних базовых станций приводило бы к большему перехлёсту зон покрытия с целью избегания "мёртвых зон", что в свою очередь потребовало бы более плотного расположения базовых станций. Большее количество соседних базовых станций приводило бы к излишним расходам на дополнительные станции, в то время как выигрыш от уменьшения зон перехлёста был бы уже весьма незначительным.

Базовая станция (BTS) обеспечивает приём/передачу сигнала между MS и контроллером базовых станций. BTS является автономной и строится по модульному принципу. Направленные антенны базовых станций могут располагаться на вышках, крышах зданий и т. д.

Контроллер базовых станций (BSC) контролирует соединения между BTS и подсистемой коммутации. В его полномочия также входит управление очередностью соединений, скоростью передачи данных, распределение радиоканалов, сбор статистики, контроль различных радиоизмерений, назначение и управление процедурой Handover.

### **Подсистема коммутации**

NSS состоит из нижеследующих компонентов.

Центр коммутации (MSC — Mobile Switching Center)

MSC контролирует определённую географическую зону с расположенными на ней BTS и BSC. Осуществляет установку соединения к абоненту и от него внутри сети GSM, обеспечивает интерфейс между GSM и ТфОП, другими сетями радиосвязи, сетями передачи данных. Также выполняет функции маршрутизации вызовов, управление вызовами, эстафетной передачи обслуживания при перемещении MS из одной ячейки в другую. После завершения вызова MSC обрабатывает данные по нему и передаёт их в центр расчётов для формирования счета за предоставленные услуги, собирает статистические данные. MSC также постоянно следит за положением MS, используя данные из HLR и VLR, что необходимо для быстрого нахождения и установления соединения с MS в случае её вызова.

Домашний регистр местоположения (HLR — Home Location Registry)

Содержит базу данных абонентов, приписанных к нему. Здесь содержится информация о предоставляемых данному абоненту услугах, информация о состоянии каждого абонента, необходимая в случае его вызова, а также Международный Идентификатор Мобильного Абонента (IMSI — International Mobile Subscriber Identity),



который используется для аутентификации абонента (при помощи AUC). Каждый абонент приписан к одному HLR. К данным HLR имеют доступ все MSC и VLR в данной GSM-сети, а в случае межсетевого роуминга — и MSC других сетей.

**Гостевой регистр местоположения (VLR — Visitor Location Registry)**

VLR обеспечивает мониторинг передвижения MS из одной зоны в другую и содержит базу данных о перемещающихся абонентах, находящихся в данный момент в этой зоне, в том числе абонентах других систем GSM — так называемых роумерах. Данные об абоненте удаляются из VLR в том случае, если абонент переместился в другую зону. Такая схема позволяет сократить количество запросов на HLR данного абонента и, следовательно, время обслуживания вызова.

**Регистр идентификации оборудования (EIR — Equipment Identification Registry)**

Содержит базу данных, необходимую для установления подлинности MS по IMEI (International Mobile Equipment Identity). Формирует три списка: белый (допущен к использованию), серый (некоторые проблемы с идентификацией MS) и чёрный (MS, запрещённые к применению). У российских операторов (и большей части операторов стран СНГ) используются только белые списки, что не позволяет раз и навсегда решить проблему кражи мобильных телефонов.

**Центр аутентификации (AUC — Authentication Center)**

Здесь производится аутентификация абонента, а точнее — SIM (Subscriber Identity Module). Доступ к сети разрешается только после прохождения SIM процедуры проверки подлинности, в процессе которой с AUC на MS приходит случайное число RAND, после чего на AUC и MS параллельно происходит шифрование числа RAND ключом K<sub>i</sub> для данной SIM при помощи специального алгоритма. Затем с MS и AUC на MSC возвращаются «подписанные отклики» — SRES (Signed Response), являющиеся результатом данного шифрования. На MSC отклики сравниваются, и в случае их совпадения аутентификация считается успешной.

**Подсистема OMC (Operations and Maintenance Center)**

Соединена с остальными компонентами сети и обеспечивает контроль качества работы и управление всей сетью. Обрабатывает аварийные сигналы, при которых требуется вмешательство персонала. Обеспечивает проверку состояния сети, возможность прохождения вызова. Производит обновление программного обеспечения на всех элементах сети и ряд других функций.

**Преимущества и недостатки**

**Преимущества стандарта GSM:**

- Меньшие по сравнению с аналоговыми стандартами (NMT-450, AMPS-800) размеры и вес телефонных аппаратов при большем времени работы без подзарядки

аккумулятора. Это достигается в основном за счёт аппаратуры базовой станции, которая постоянно анализирует уровень сигнала, принимаемого от аппарата абонента. В тех случаях, когда он выше требуемого, на сотовый телефон автоматически подаётся команда снизить излучаемую мощность.

- Хорошее качество связи при достаточной плотности размещения базовых станций.
- Большая ёмкость сети, возможность большого числа одновременных соединений.
- Низкий уровень промышленных помех в данных частотных диапазонах.
- Улучшенная (по сравнению с аналоговыми системами) защита от подслушивания и нелегального использования, что достигается путём применения алгоритмов шифрования с разделяемым ключом.
- Эффективное кодирование (сжатие) речи. EFR-технология была разработана фирмой Nokia и впоследствии стала промышленным стандартом кодирования/декодирования для технологии GSM (см. GSM-FR, GSM-HR и GSM-EFR)
- Широкое распространение, особенно в Европе, большой выбор оборудования.
- Возможность роуминга. Это означает, что абонент одной из сетей GSM может пользоваться сотовым телефонным номером не только у себя «дома», но и перемещаться по всему миру переходя из одной сети в другую не расставаясь со своим абонентским номером. Процесс перехода из сети в сеть происходит автоматически, и пользователю телефона GSM нет необходимости заранее уведомлять оператора (в сетях некоторых операторов, могут действовать ограничения на предоставление роуминга своим абонентам, более детальную информацию можно получить обратившись непосредственно к своему GSM оператору)

#### **Недостатки стандарта GSM**

- Искажение речи при цифровой обработке и передаче.
- Связь возможна на расстоянии не более 120 км от ближайшей базовой станции даже при использовании усилителей и направленных антенн. Поэтому для покрытия определённой площади необходимо большее количество передатчиков, чем в NMT-450 и AMPS.

#### **Моделирование канала стандарта GSM в MATLAB Simulink [17]**

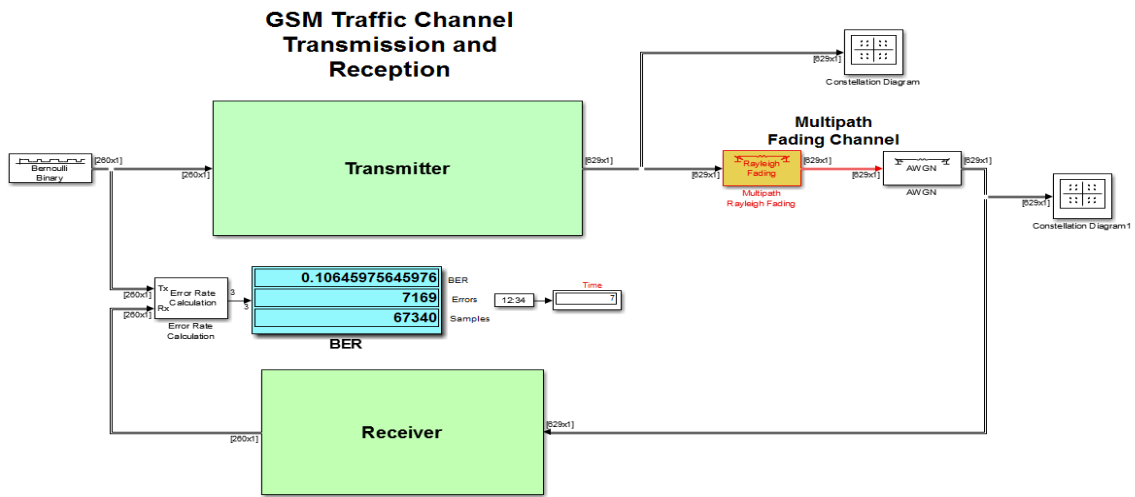


Рис. 5.2. Модель GSM в Simulink MATLAB 2015

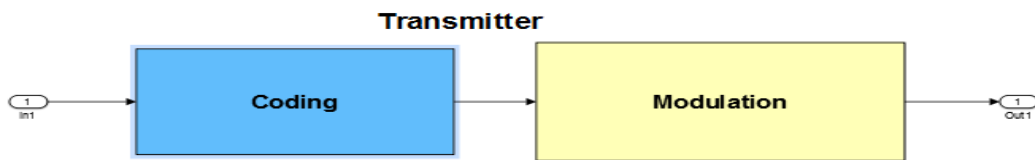


Рис. 5.3. Схема передатчика

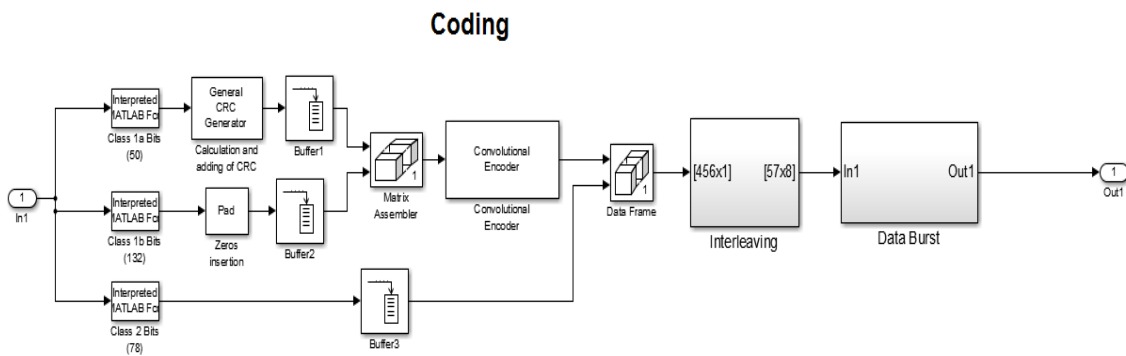


Рис. 5.4. Схема кодера

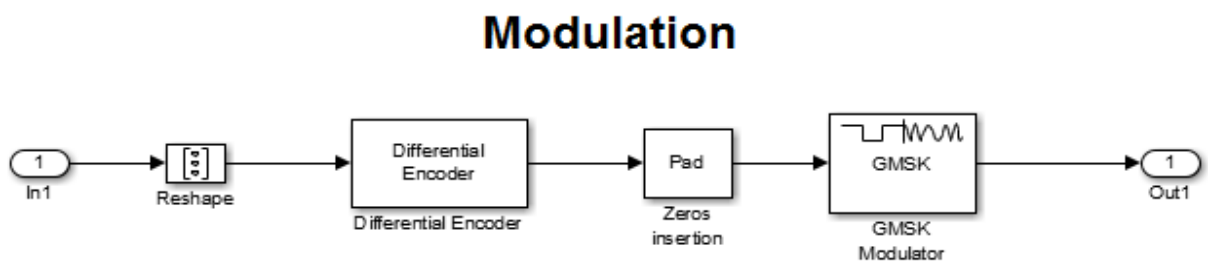


Рис. 5.5. Схема модулятора

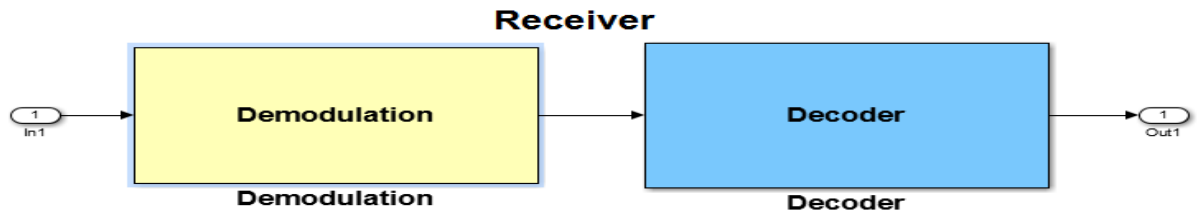


Рис. 5.6. Схема приемника

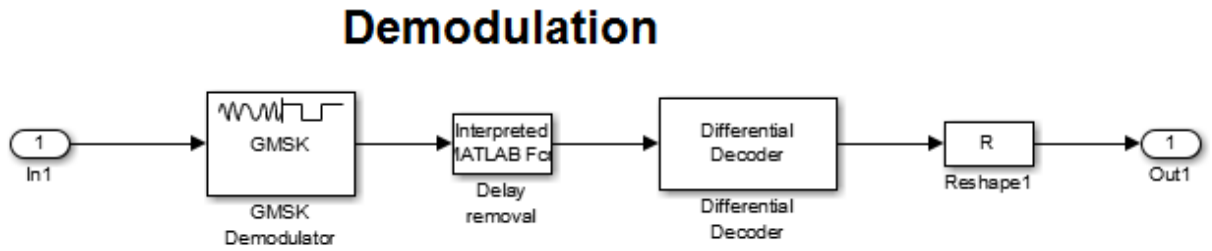


Рис. 5.7. Схема демодулятора

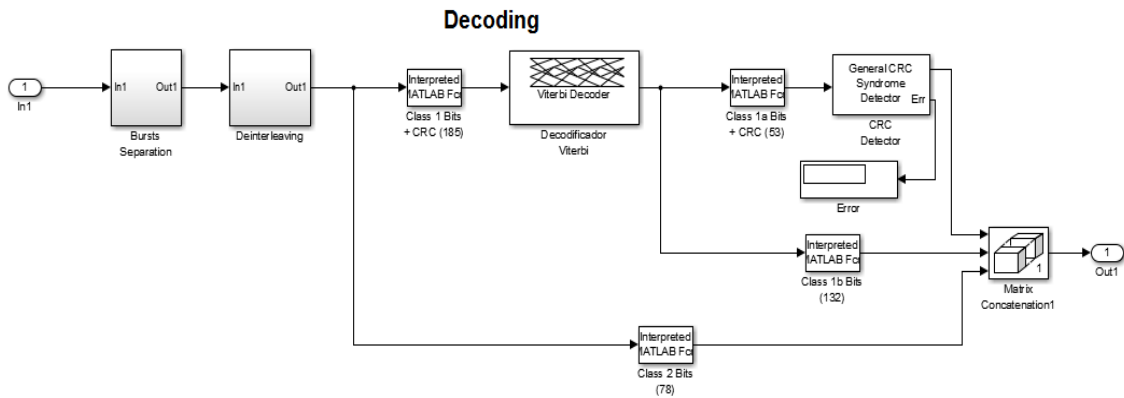


Рис. 5.8. Схема декодера

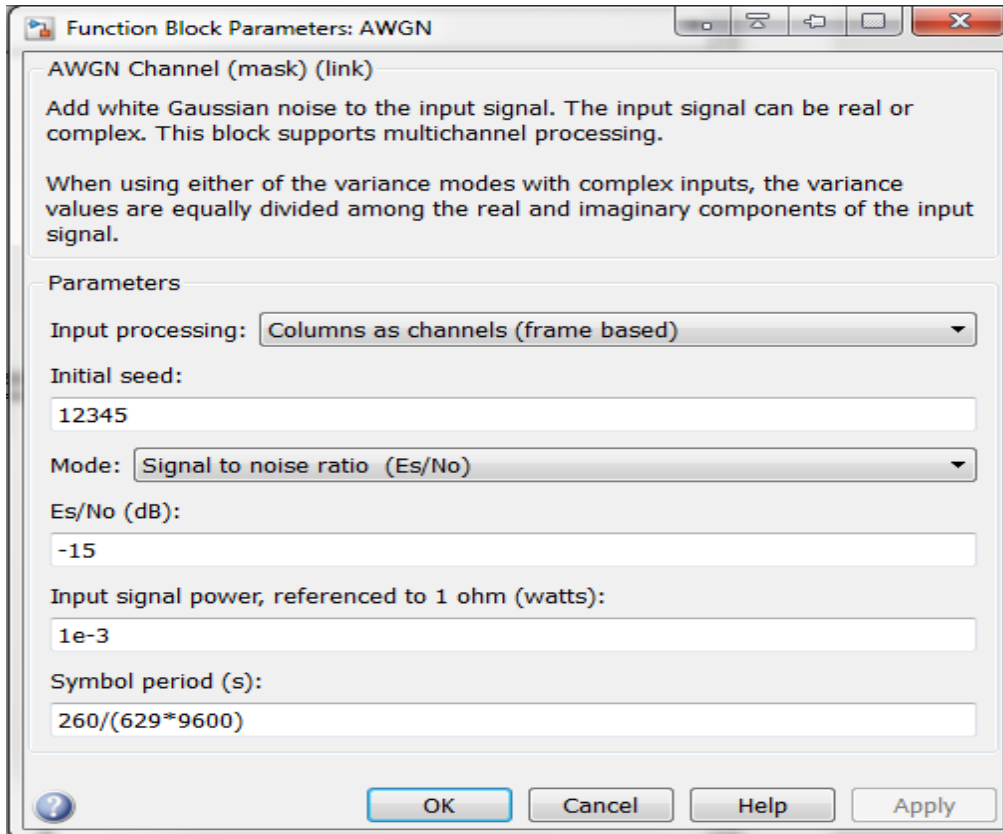


Рис. 5.9. Изменение отношения сигнал/шум.

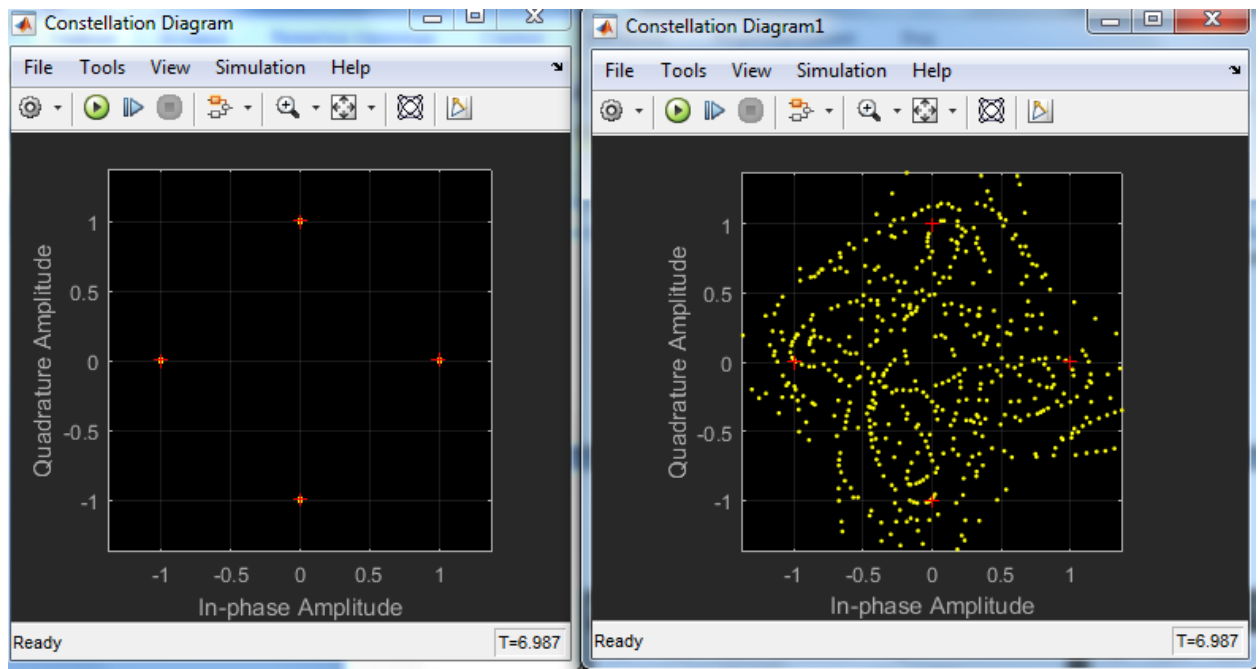


Рис. 5.10. Сравнение передаваемого созвездия и принятого, при отношении С/Ш – 20 Дб.

**BER**

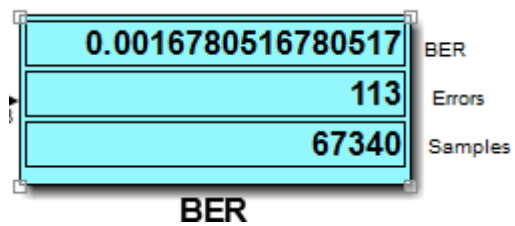


Рис. 5.11. BER при отношении С/Ш 15 Дб.

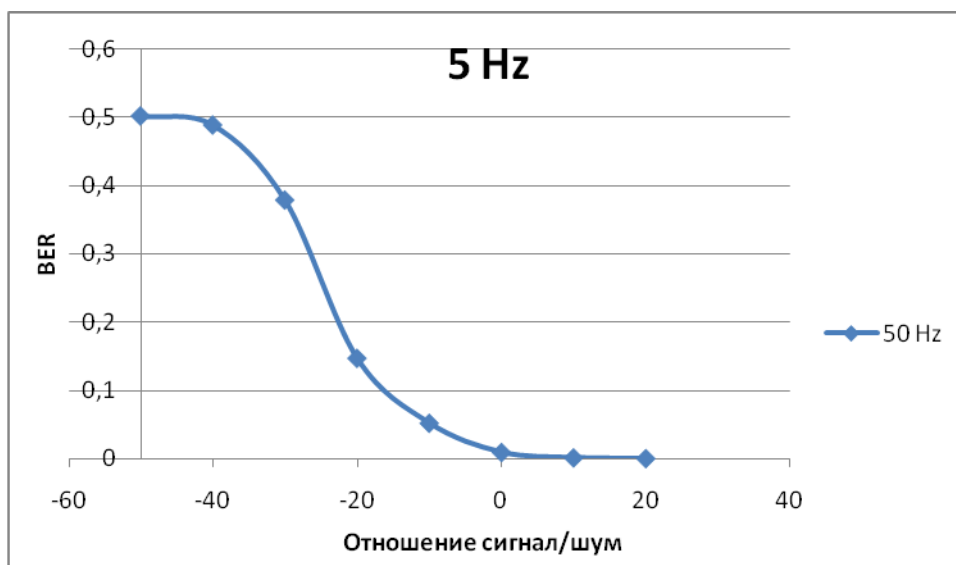


Рис. 5.12. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 5 Гц

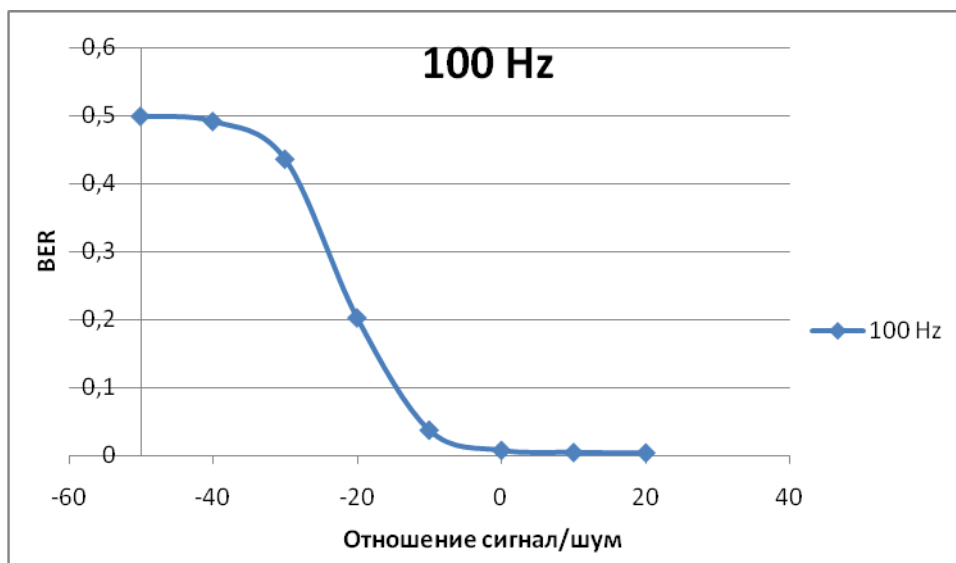


Рис. 5.13. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 100 Гц

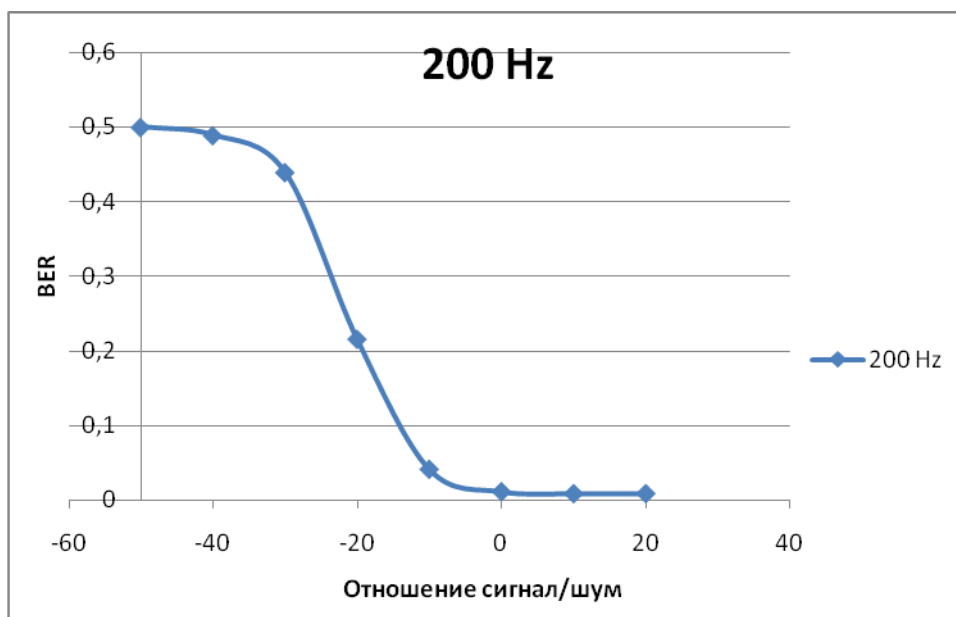


Рис. 5.14. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 200 Гц

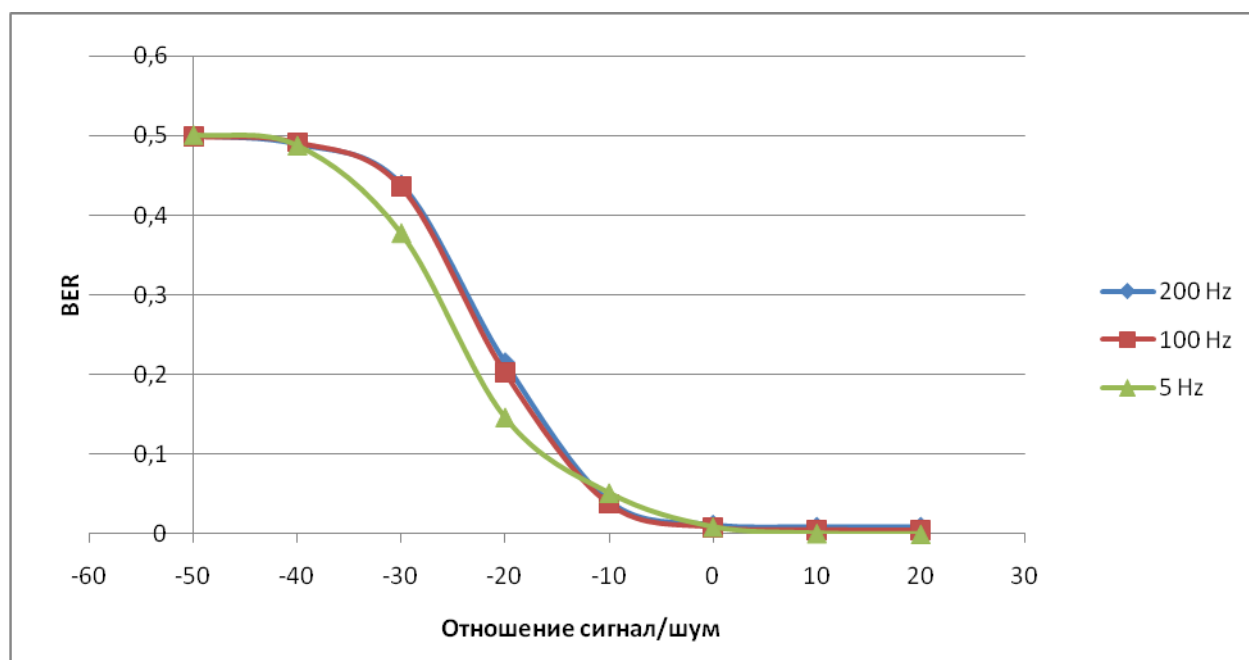


Рис. 5.15. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 5, 100, 200 Гц

В ходе данной работы мы исследовали стандарт GSM. Он позволяет производить эффективную передачу сигнала при довольно малом соотношении Сигнал Шум. Сигнал GSM зависим от Доплеровского эффекта, но учитывая, что скорость ЭМ волн крайне большая, по сравнению со скоростью объектов связи, то этот эффект нормализуется.

## 5.2. Проектирование системы мобильной связи стандарта CDMA [17-20]

В настоящее время развиваются системы мобильной связи, так как каждый год осуществляется рост числа абонентов, что приводит к загруженности сети, необходимости улучшения качества связи, улучшения емкости базовых станций, а также увеличения зоны покрытия сот. Но необходимо улучшать и безопасность мобильной связи, так как злоумышленники могут осуществить перехват информационного сигнала.

Новые поколения сотовой связи появляются достаточно быстро, но их внедрение требует значительных временных ресурсов, поэтому до сих пор основополагающими считаются технологии CDMA и GSM, но технология CDMA работает не только как отдельный стандарт, эта технология используется, например, в LTE.

CDMA - система множественного доступа с кодовым разделением - стала, возможно, самой многообещающей системой, появившейся на мировом рынке. Десятилетия назад эта технология использовалась в военной связи (США), а сегодня известна всем как глобальный цифровой стандарт для коммерческих систем коммуникаций. Технология использования CDMA была протестирована, стандартизирована, лицензирована и запущена в производство большинством поставщиков беспроводного оборудования и применяется во всем мире. В отличие от других методов доступа абонентов к сети, где энергия сигнала концентрируется на выбранных частотах или временных интервалах, сигналы CDMA распределены в непрерывном частотно-временном пространстве. Фактически метод манипулирует и частотой, и временем, и энергией.

CDMA применяется в 32 странах Азии и Океании, 2 странах Северной Америки, 14 странах Европы и 45 странах Африки.

История технологии CDMA берёт своё начало в 30-е годы прошлого (XX) столетия. В 1935 году в СССР академик Агеев Дмитрий Васильевич издал небольшим тиражом брошюру под странным названием "Кодовое разделение каналов". В ней были определены основы ортогонального разделения сигналов, разделения сигналов по форме. В то время реально существовал только один способ разделения каналов связи – частотный. И относилось это, в основном, к каналам радиосвязи. При таком методе каждый канал занимает некоторую свою полосу в общем спектре частот. Эти полосы относительно узки и разделены между собой защитными интервалами. Частотный диапазон ещё не был так перегружен как сегодня, поэтому использование такого способа разделения каналов связи считалось достаточно простым и логичным, поскольку осуществлялась манипуляция только одним параметром сигнала – частотой. Однако учёные, работавшие в области разработок новейших систем связи, в общем, и радиосвязи, в частности, понимали, что такая идиллия не будет долгой. Кроме того,



узкополосные радиосигналы очень чувствительны к селективным замираниям. Требовалось разработать методику, минимизирующую потери полезного сигнала за счёт селективных замираний и позволяющую бережнее относиться к используемому диапазону частот.

Несколько позже, примерно в одно и то же время, появляются работы «Математическая теория связи» Клода Шеннона (США) и «Теория потенциальной помехоустойчивости» Владимира Александровича Котельникова (СССР).

Впервые радиооборудование, использующее кодовое разделение каналов, появилось в США где-то в конце 50-х годов. Технология CDMA нашла применение в военных системах, где успешно отработала более двух десятков лет. Во второй половине 80-х годов военное ведомство США рассекретило данную технологию и разрешило ее использование в гражданских средствах радиосвязи (диапазон 800 МГц).

В сентябре 1995 года в Гонконге фирма HUTCHISON начала развертывание первой в мире коммерческой сети CDMA, используя базовое оборудование Motorola (базовые станции SC 9600 и коммутирующее оборудование EMX 2500) и мобильные телефоны Qualcomm. На конец 1996 года эта сеть насчитывала 113 сот, работала на одном частотном канале с полосой 1,25 МГц и обслуживала более 40.000 абонентов. Правда, соты CDMA были наложены на существующую сеть AMPS и мобильные терминалы работали в дуалмодовом режиме, т.е. при сбое в CDMA-сети абонентский терминал автоматически переключался в сеть AMPS (FDMA). В Корее в январе 1996 года фирма KMT, используя оборудование Gold Star, начала коммерческую эксплуатацию CDMA-сети. А в апреле Shinsengi Telecom начала создавать новую сеть на базе оборудования Samsung, Sony, Qualcomm. На конец 1996 года эти сети обслуживали более 200.000 клиентов. Корея приняла IS-95 в качестве национального стандарта сотовой связи. В США развертыванием CDMA-сетей занимаются такие фирмы, как Air Touch (Сан-Диего, Лос-Анджелес), VANM (Трентон, Нью-Джерси), 360-Communications (Лас-Вегас, Невада). Они используют базовое оборудование Qualcomm, Lucent Technologies, Motorola, а также абонентские терминалы фирм Qualcomm, Sony, Nortel. В Австралии, в канун Олимпийских игр, были построены сети сотовой мобильной радиотелефонной связи в Сиднее и Мельбурне на базе оборудования CDMA-one (IS-95) производства фирмы Samsung.

Кроме вышеназванного стандарта (IS-95) в 1999 году был разработан и широкополосный вариант - W-CDMA (Ericsson, Швеция), функционирующий в диапазоне 1800 МГц. Он предназначался для использования в районах с высокой плотностью населения, так как обладал ещё большей пропускной способностью.

## **Стандарты CDMA**

В CDMA системах каждый голосовой поток отмечен своим уникальным кодом и передается на одном канале одновременно со многими другими кодированными голосовыми потоками. Принимающая сторона использует тот же код для выделения сигнала из шума. Единственное отличие между множественными голосовыми потоками это уникальный код. Канал, как правило, очень широк и каждый голосовой поток занимает целиком всю ширину диапазона. Эта система использует наборы каналов шириной 1.23МГц. Голос кодируется на скорости 8.55кбит/с, но определение голосовой активности и различные скорости кодирования могут урезать поток данных до 1200бит/с. В системах CDMA могут устанавливаться очень прочные и защищенные соединения, несмотря на экстремально низкую величину мощности сигнала, теоретически - сигнал может быть слабее, чем уровень шума

### **Стандарт CDMAOne**

Стандарт cdmaOne, существует в вариациях IS-95a, IS-95b (cellular по американской терминологии, 800 МГц) и J-STD-008 (PCS, диапазон 1900). Аббревиатура IS (interim standard - временной стандарт) используется для учета в Ассоциации телекоммуникационной промышленности TIA (Telecommunications Industry Association). Как правило, в сетях cdmaOne используется IS-95a, он обеспечивают передачу сигнала со скоростью 9,6 кбит/с (с кодированием) и 14,4 кбит/с (без кодирования). Версия IS-95b основана на объединении нескольких каналов CDMA, организуемых в прямом направлении (от базовой станции к мобильной). Скорость может увеличиваться до 28,8 кбит/с (при объединении двух каналов по 14,4 кбит/с) или до 115,2 кбит/с (8 каналов по 14,4 кбит/с). Собственно, кроме IS-95 сети cdmaOne используют еще целый набор протоколов и стандартов, их список можно найти в любой достаточно глубокой статье по этой теме. Прямой и обратный каналы располагаются соответственно в диапазонах 869,040-893,970 и 824,040-848,860 МГц. Используются 64 кода Уолша и несущие в 1.25 МГц.

### **Стандарт WCDMA**

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access - широкополосный CDMA) - технология радиointерфейса избранная большинством операторов сотовой связи Японии и (в январе 1988 года) институтом ETSI (European Telecommunications Standards Institute) для обеспечения широкополосного радиодоступа с целью поддержки услуг третьего поколения.

Технология оптимизирована для предоставления высокоскоростных мультимедийных услуг типа видео, доступа в Интернет и видеоконференций; обеспечивает скорости доступа вплоть до 2 Мбит/с на коротких расстояниях и 384

Кбит/с на больших с полной мобильностью. Такие величины скорости передачи данных требуют широкую полосу частот, поэтому ширина полосы WCDMA составляет 5 МГц. Технология может быть добавлена к существующим сетям GSM и PDC, что делает стандарт WCDMA наиболее перспективным с точки зрения использования сетевых ресурсов и глобальной совместимости.

WCDMA (широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов) представляет собой технологию, использующую расширенную полосу пропускания и разновидность принципа DMA. Это технология мобильной радиосвязи третьего поколения, обеспечивающая значительно более высокие скорости передачи данных, чем стандарт GSM. WCDMA поддерживает передачу голоса, изображений, данных и видео в сетях мобильной связи на скорости до 2 Мбит/с (локальный доступ) или 384 кбит/с (глобальный доступ). WCDMA используется в основном в Европе при переходе от стандарта GSM к стандарту UMTS.

### **Стандарт CDMA2000**

Стандарт cdma2000 является дальнейшим развитием стандарта 2 поколения cdmaOne. Дальнейшим развитием cdmaOne должен был стать IS-95c, и именно это обозначение очень часто используется производителями. Официальным обновлением стандарта, разработанным компанией Qualcomm и утвержденным ITU (Международный союз электросвязи, International Telecommunication Union), является cdma2000. В документах Lucent Technologies встречается обозначение IS-2000. Наконец, международный союз электросвязи (МСЭ) отобрал из десяти предложенных проектов пять радиоинтерфейсов третьего поколения IMT-2000 (International Mobile Telecommunications System - 2000 - Международная система мобильной связи - 2000), в их числе - IMT-MC (Multi Carrier), который представляет собой модификацию многочастотной системы cdma2000, в которой обеспечивается обратная совместимость с оборудованием стандарта cdmaOne (IS-95).

Еще один из пяти стандартов IMT-2000 - IMT-DS (Direct Spread) - построен на базе проектов W-CDMA и взят за основу европейской системы UMTS.

На начало 2003г. из 127 миллионов пользователей CDMA почти 15 миллионов использовали технологию cdma2000. В течение первых семи месяцев 2002 года, в Азии и Америке было запущено 11 сетей CDMA2000 и общее количество этих сетей составляло 18. Это - 99% рынка 3G, на IMT-MC приходилось 14.8 миллионов абонентов, на UMTS - 0.13 миллиона. Однако, стоит отметить, что реализованная фаза cdma2000 1X все же не является полноценным 3G, ибо не дотягивает до обязательных двух мегабит. Поэтому ее чаще называют 2.5G.

Изначально cdma2000 (IMT-МС) разделили на две фазы - 1X и 3X. Именно к первой фазе применяется название IS-95C. А вторую позже назвали 1X-EV (evolution), разделив ее на две фазы - cdma2000 1X EV-DO (data only) и cdma2000 1X EV-DV (data & voice).

И именно стандарт cdma2000 1X EV-DO подразумевается под 3G IMT-МС. Стандарт 1x-EV-DO был принят TTA в октябре 2000 года и предусматривает следующую схему функционирования: аппарат одновременно производит поиск сети 1x и 1xEV, передачу данных осуществляет с помощью 1xEV, голоса - с помощью 1x. Стандарт 1xEV-DV полностью соответствует всем требованиям 3G.

Следует отметить, что стандарты семейства cdma2000 не требуют организации отдельной полосы частот и в ходе их эволюционного развития от cdmaOne могут быть реализованы во всех частотных диапазонах, используемых системами сотовой подвижной связи (450, 700, 800, 900, 1700, 1800, 1900, 2100 МГц).

### Структура и формирование сигналов

#### Схема кодирования в прямом канале (от базовой станции к абоненту).

Базовая скорость передачи данных в канале составляет 9,6 кбит/с, что достигается добавлением дополнительных корректирующих двоичных символов к цифровому потоку вокодера 8,55 кбит/с.

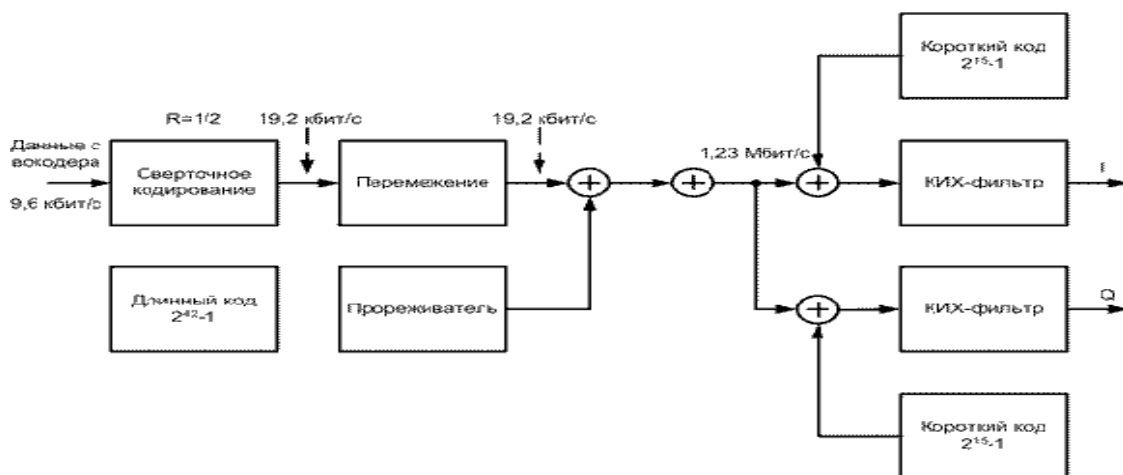


Рис. 5.16. Схема кодирования в прямом канале

Для реализации на приемной стороне прямой коррекции ошибок (без повторной передачи сообщения) в канале используется избыточное кодирование. Для этого базовый цифровой поток разбивается на пакеты длительностью по 20 мс и подается на сверточный кодер с половинной скоростью. На его выходе число битов удваивается. Затем данные перемежаются, т. е. перемешиваются во временном интервале 20 мс. Это делается для того, чтобы равномерно распределить в потоке данных (после обратного перемежения) потерянные во время передачи биты. Известно, что ошибочно принятые символы обычно формируют группы. В то же время, схема прямой коррекции ошибок работает наилучшим образом, когда ошибки распределены равномерно во времени. Это

происходит после осуществления на приемной стороне процедуры, обратной перемежению при передаче. После перемежения цифровой поток преобразуется с помощью длинного кода и логической операции "исключающее ИЛИ" (сложение по модулю два). По определению, длинными кодами (кодами максимальной длины - М-последовательностями) являются коды, которые могут быть получены с помощью регистра сдвига или элемента задержки заданной длины.

Максимальная длина двоичной последовательности, которая может быть получена с помощью генератора, построенного на основе регистра сдвига, равна  $2^n - 1$  двоичных символов, где  $n$  - число разрядов регистра сдвига. В аппаратуре стандарта CDMA длинный код формируется в результате нескольких последовательных логических операций с псевдослучайной двоичной последовательностью, генерируемой в 42-разрядном регистре сдвига, и двоичной 32-битовой маской, которая определяется индивидуально для каждого абонента. Такой регистр сдвига применяется во всех базовых станциях этого стандарта для обеспечения режима синхронизации всей сети. Длина М-последовательности при этом составляет 4 398 046 511 103 бит и если ее элементы формируются с тактовой частотой, например, 450 МГц, то период повторения будет составлять 9773,44 с = 2 ч 43 мин. Это значит, что если даже удастся засинхронизировать приемник в случае несанкционированного перехвата, то чтобы определить структуру сигнала-носителя необходимо вести наблюдение в течение почти 3-х часов, а с применением индивидуальной 32-битовой маски "подслушивание" практически исключено. Так как информационный поток имеет скорость 19,2 Кбит/с, то в прямом канале используется только каждый 64-й символ длинного кода. Следующий этап преобразования сообщения - кодирование с помощью кодов Уолша. Любая строка матрицы Уолша ортогональна другой строке. Матрица Уолша размером 2 имеет вид:

$$W_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Матрицы больших размеров образуются следующим образом:

$$W_{2N} = \begin{pmatrix} W_N & W_N \\ W_N & -W_N \end{pmatrix}$$

т.е., например,

$$W_8 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Можно показать, что строки матрицы Уолша ортогональны. Ортогональность строк  $x$  и  $y$  длиной  $N$  определяется следующим условием:

$$\sum_{i=1}^N x_i y_i = 0$$

По сути в этом случае вычисляется значение ВКФ двух различных строк при временном сдвиге равном нулю.

Один ряд матрицы Уолша ставится в соответствие каналу связи между абонентом и базовой станцией. Если на входе кодера "0", то посылается соответствующий ряд матрицы (код Уолша), если "1" - посылается последовательность, сформированная путем логического отрицания соответствующего ряда матрицы (кода Уолша). При точном совпадении начала пришедшей последовательности и имеющейся (строка матрицы  $W_{64}$ ) наблюдаются пики корреляционной функции положительной и отрицательной полярностей - в зависимости от передаваемого бита. В случае обработки "чужого" сигнала на выходе в момент окончания сигнала не будет ничего, т.е. происходит разделение каналов при приеме абонентской станцией. Кодирование по Уолшу повышает скорость информационного потока с 19,2 Кбит/с до 1,2288 Мбит/с. Соответственно расширяется и спектр сигнала. На заключительном этапе двоичный поток разделяется между синфазным и квадратурным каналами (I- и Q-каналами) для последующей передачи с использованием квадратурной фазовой манипуляции (QPSK). До подачи на смесители цифровой поток в каждом из каналов преобразуется с помощью короткого кода и операции сложения по модулю два.

Короткий код представляет собой псевдослучайную двоичную последовательность длиной 32768 двоичных символов, генерируемую со скоростью 1,3288 Мбит/с. Эта последовательность является общей для всех базовых и подвижных станций в сети. Короткий код формируется в 15-разрядном регистре сдвига с линейной обратной связью. Результирующий двоичный поток в каждом канале проходит через цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр), что позволяет ограничить полосу излучаемого сигнала. Частота среза фильтра составляет около 615

кГц. Полученные аналоговые сигналы поступают на соответствующие входы I/Q-модулятора. Ряд информационных сигналов образуется путем слияния I- и Q-каналов.

Поскольку все пользователи получают объединенный сигнал, то для выделения информации необходимо передавать опорный сигнал по каналу, получившему название пилотного. В пилотном канале передается нулевой информационный сигнал, код Уолша для этого канала формируется из нулевого ряда матрицы Уолша (все единицы). Другими словами, в пилотном канале передается только короткий код. Обычно на нем излучается около 20% общей мощности. Опорный сигнал необходим для последующей фазовой демодуляции. Короткий код позволяет многократно использовать в каждой ячейке один и тот же набор кодов Уолша. Каждая базовая станция имеет свой временной сдвиг при формировании кода и поэтому может быть однозначно определена в сети. Основано это на уже описанном свойстве псевдослучайных двоичных последовательностей: значение АКФ близко к нулю для всех временных смещений более одной длины бита.

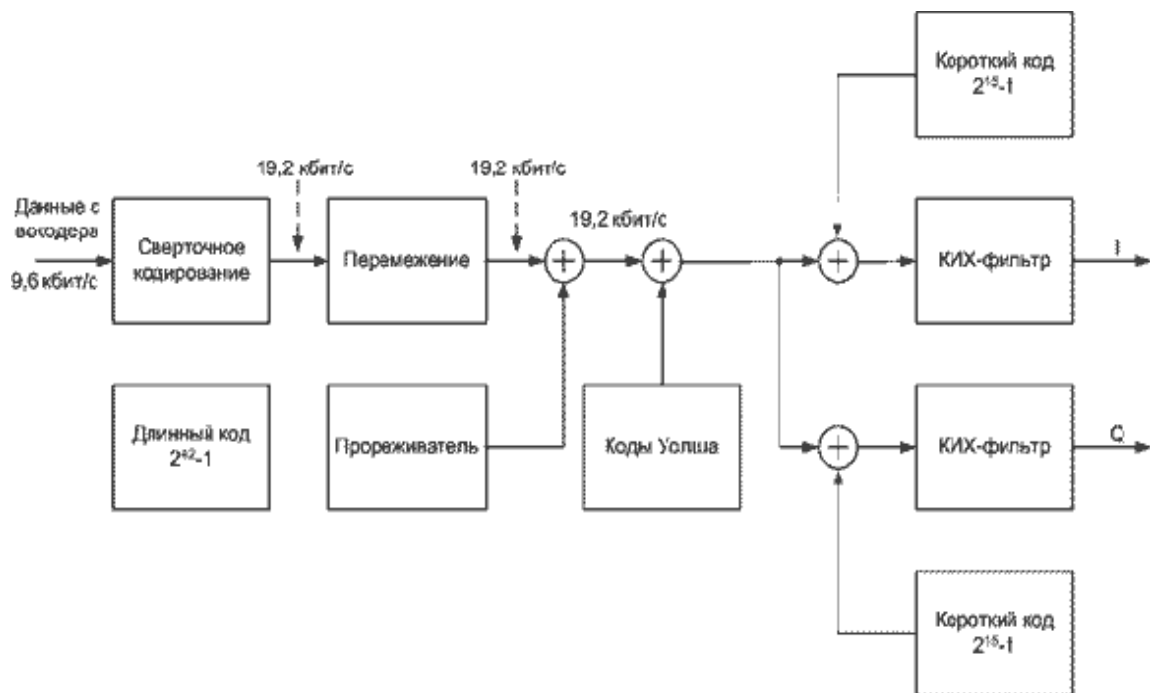


Рис. 5.17. Схема кодирования в обратном канале.

В обратном канале (от абонента к базовой станции) применяется другая схема кодирования. Подвижная станция не может использовать преимуществ трансляции опорного сигнала. В этом случае необходимо было бы передавать два сигнала, что значительно усложнило бы демодуляцию в приемнике базовой станции. В обратном канале применяется такой же, как и в прямом, вокодер и сверточное кодирование со скоростью 1/3, что повышает скорость передачи данных с базовой 9,6 до 28,8 кбит/с, и перемежение в пакете длительностью 20 мс. После перемежения выходной поток разбивается на слова по шесть битов в каждом. Шестибитовому слову можно поставить в соответствие один из 64 кодов Уолша. Таким образом, каждый абонентский терминал

использует весь их набор. После этой операции скорость потока данных повышается до 307,2 Кбит/с. Далее поток преобразуется с помощью длинного кода, аналогичного используемому базовой станцией. На этом этапе происходит разделение пользователей. Абонентская емкость системы определяется обратным каналом. Для ее увеличения применяется регулирование мощности в обратном канале, методы пространственного разнесения приема на базовой станции и др. Окончательное формирование потоков данных происходит таким же образом, как и в базовой станции, за исключением дополнительного элемента задержки на  $1/2$  длительности символа в Q-канале для реализации, смещенной QPSK.

В системе CDMA применяются квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) в базовой и смещенная QPSK в подвижных станциях. При этом информация извлекается путем анализа изменения фазы сигнала, поэтому фазовая стабильность системы - критичный фактор при обеспечении минимальной вероятности появления ошибки в сообщениях. Применение смещенной QPSK позволяет снизить требования к линейности усилителя мощности подвижной станции, так как амплитуда выходного сигнала при этом виде модуляции изменяется значительно меньше. До того, как интерференционные помехи будут подавлены методами цифровой обработки сигналов, они должны пройти через высокочастотный тракт приемника и не вызвать насыщения маломощного широкополосного усилителя (МШУ) и смесителя. Это заставляет разработчиков системы искать баланс между динамическими и шумовыми характеристиками приемника.



Рис. 5.18. Структурная схема CDMA

### Моделирование CDMA2000 1xRTT

Модель состоит из трех основных блоков:

1. Базовая станция (передатчик);
2. Канал;
3. Мобильная станция (приемник).

Канал имеет три режима работы:

1. Нет канала;
2. Канал с шумами;



## Канал с многолучевым распространением.

Мобильный приемник состоит из декодера и приемника, которые выполняют все операции необходимые декодирования сигнала [25].

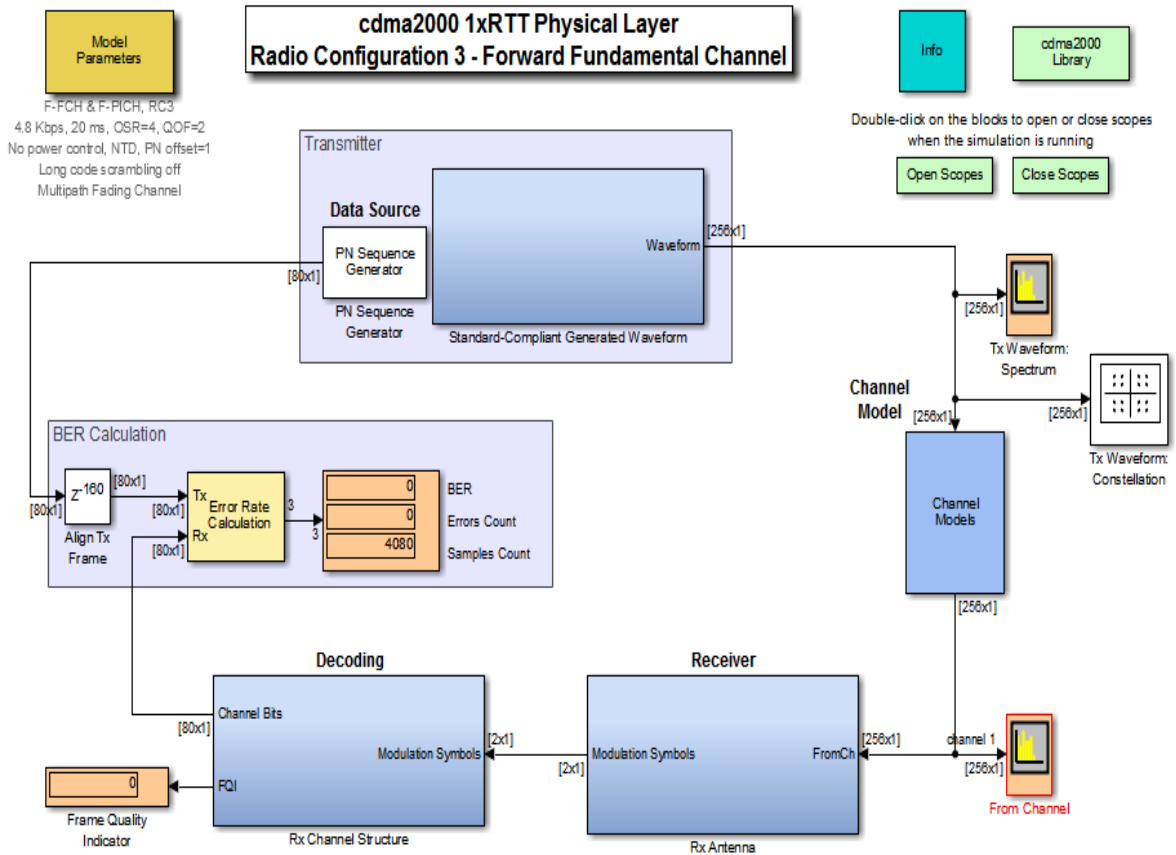


Рис.5.19. Модель CDMA2000 1xRTT в MATLAB R2015b

Развернутая модель передатчика представлена на рисунке 5.20.

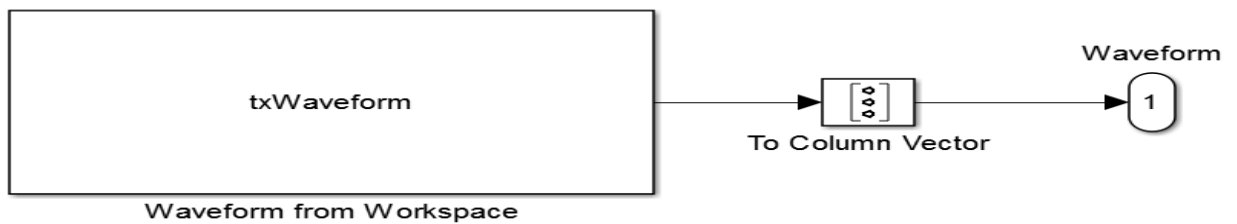


Рис. 5.20. Модель передатчика

Блок txWaveform содержит в себе длинный программный код посредством которого и генерируется сигнал, далее этот сигнал формируется в вектор с помощью блока To Column Vector. Этот вектор передается по каналу и затем поступает в приемник. Развернутая модель приемника представлена на рисунке 5.21.

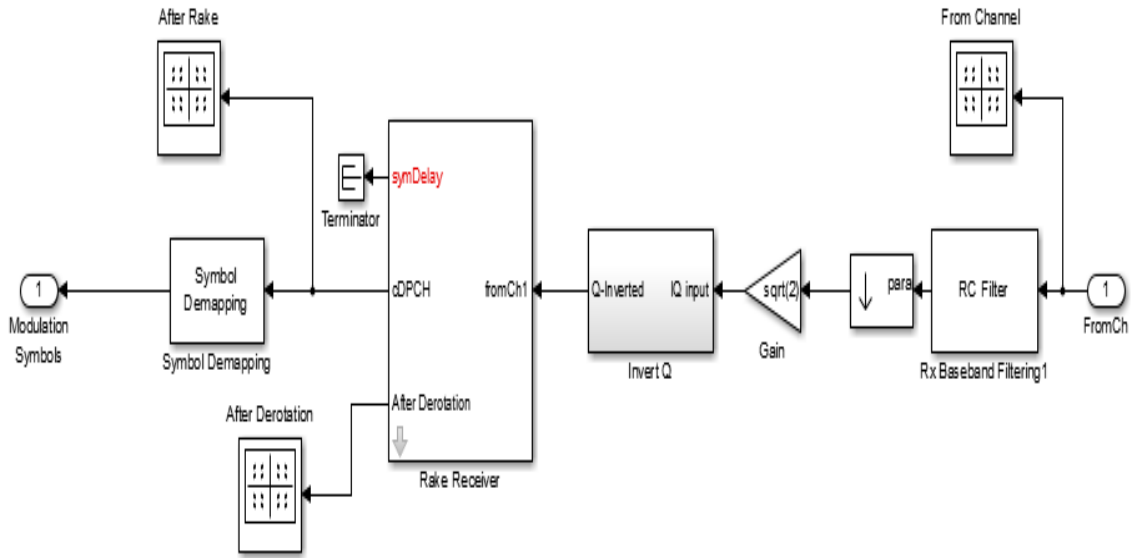


Рис. 5.21. Модель приемника.

Принятый сигнал поступает на фильтр RC Filter, АЧХ которого представлена на рисунке 6, и затем усиливается с помощью блока Gain в корень из двух раз, после чего сигнал поступает в блок Invert Q, который разделяет его на реальную и мнимую части, умножает мнимую часть на -1 и затем объединяет реальную и мнимую части обратно. Далее восстанавливается созвездие с помощью блока Rake Receiver, после чего сигнал поступает в блок Symbol Demapping для демодуляции. Полученные символы модуляции поступают на декодер, развернутая модель которого представлена на рисунке 5.22.

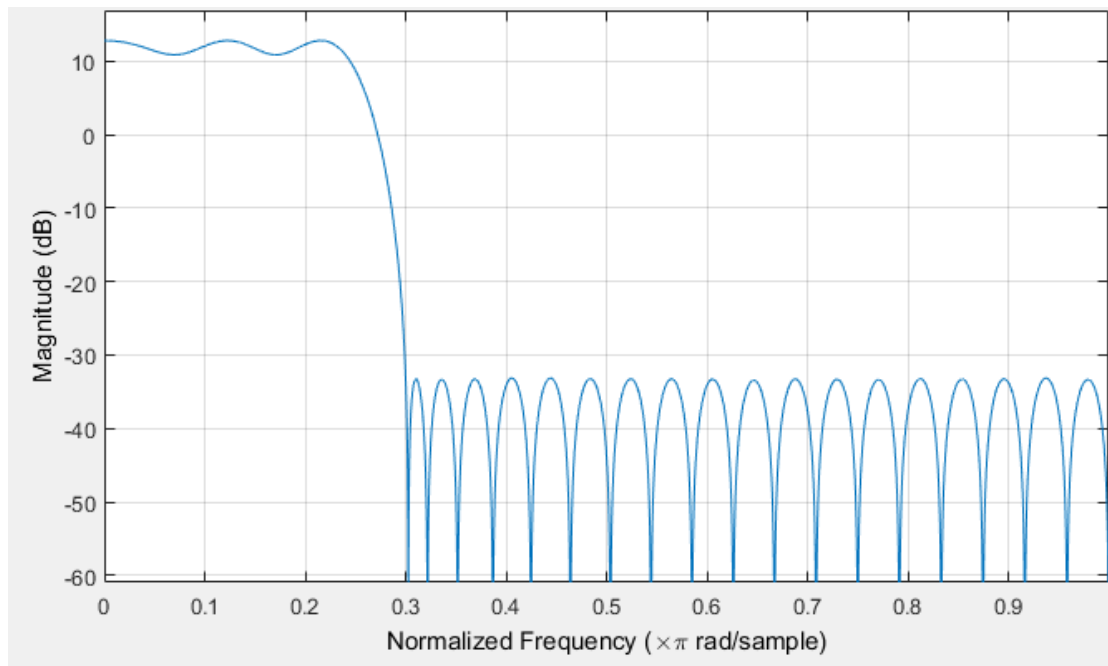


Рис. 5.22. АЧХ фильтра приемника

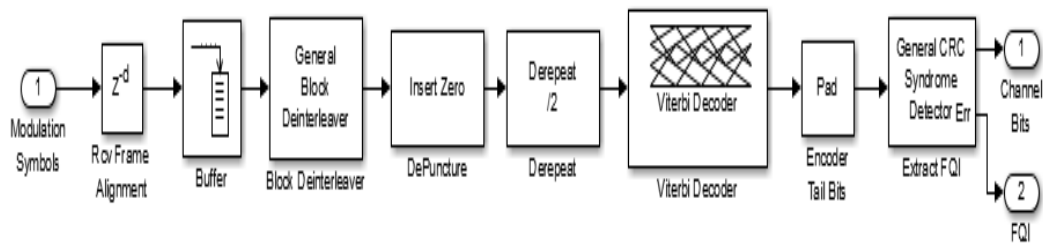


Рис. 5.23. Модель декодера.

Полученные символы модуляции поступают в блок Rcv Frame Alignment, который представляет собой задержку на 768 тактов, далее символы поступают в блок Buffer для накопления 768 символов. Накопленные символы поступают в блок Block Deinterleaver для обратного перемежения, далее данные поступают в блок Insert Zero, который возвращает последовательности нулей, замененных на специальные символы, далее данные поступают в блок Derepeat, обратное преобразование кодов с повторением с коэффициентом повторения 2, далее данные поступают на декодер Витерби и наконец в блок Encoder Tail Bits, который добавляет нули или урезает число бит если оно не равно 80.

### Параметры модели

Модель позволяет изменять такие настройки как скорость потока и вид канала. В зависимости от вида канала можно задавать значение отношения сигнал/шум, а также параметры многолучевого распространения сигнала: максимальное Доплеровское отклонение частоты, вектор задержки и вектор ослабления/усиления. Длины векторов определяют количество лучей в канале.

### Результаты моделирования

Компонент расчета BER сравнивает декодированный сигнал и сигнал, сгенерированный базовой станцией. Если BER равен нулю, то сигнал не подвергся каким-либо изменениям либо ошибки удалось исправить. Сигнал с базовой станции перед попаданием в блок расчета BER проходит через задержку для того что бы выровнять фреймы.

Для того что бы отобразить все возможные графики необходимо два раза кликнуть по кнопке Open Scores в правом верхнем углу. В результате чего отобразятся следующие графики:

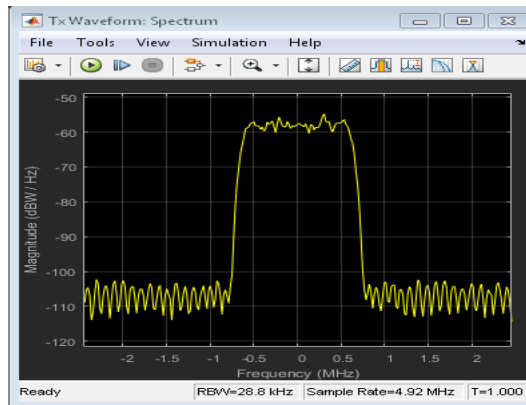


Рис. 5.24. Спектр сигнала сгенерированного базовой станцией.

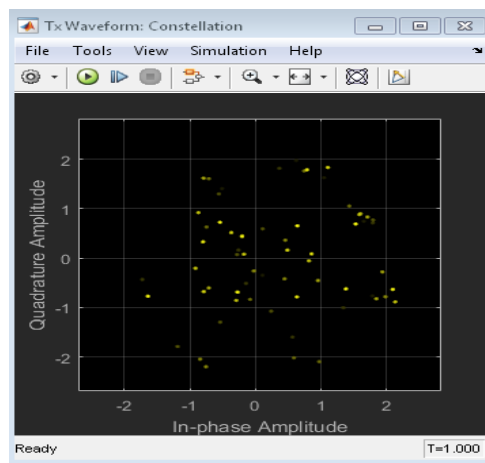


Рис. 5.25. Сгенерированный базовой станцией сигнал на I-Q диаграмме

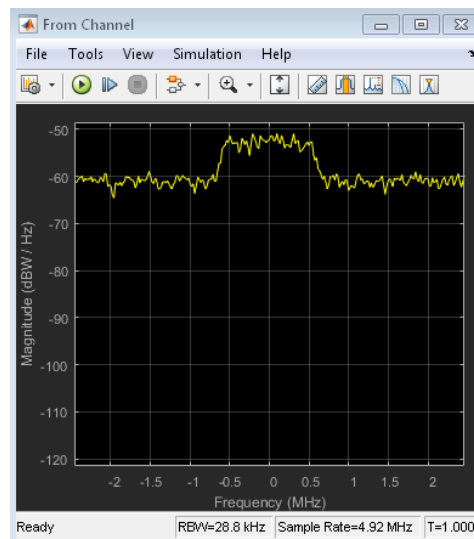


Рис. 3.26. Спектр принимаемого мобильной станцией сигнала после прохождения через канал.

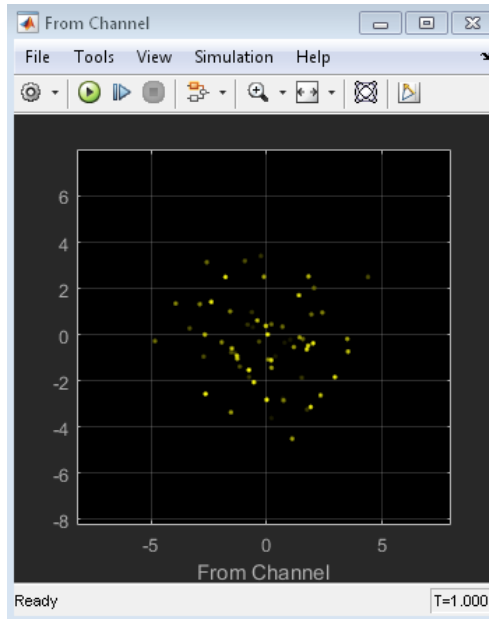


Рис. 5.27. Сигнал принимаемый мобильной станцией после прохождения через канал на I-Q диаграмме.

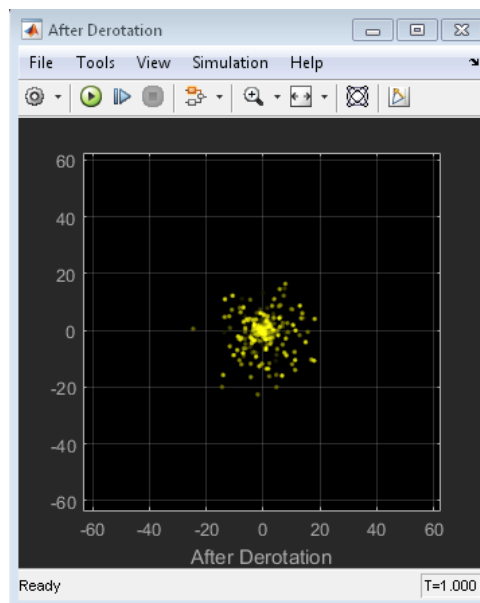


Рис. 5.28. Сигнал, принятый мобильной станцией

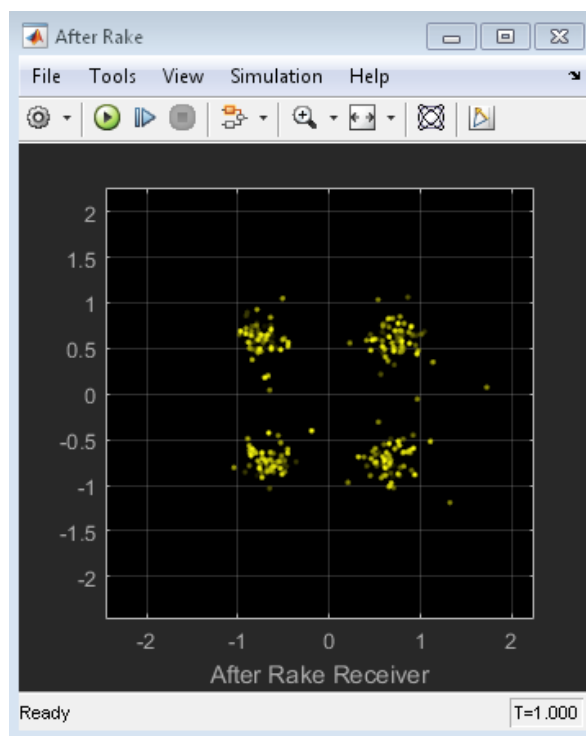


Рис. 5.29. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме.

### Исследование модели

В блоке Model Parameters во вкладке Channel Settings выберем Channel Model: No Channel.

Результат моделирования:

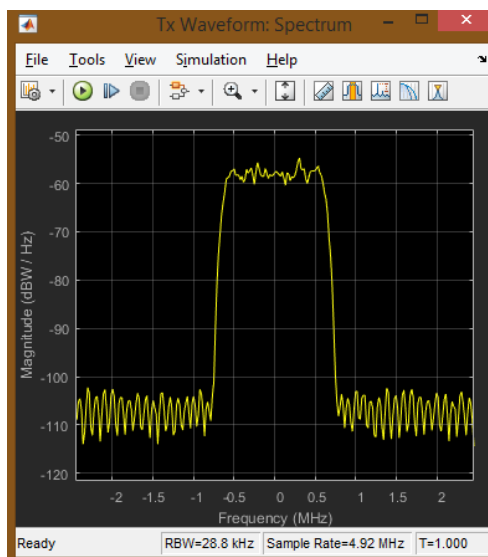


Рис. 5.30. Спектр сигнала сгенерированного базовой станцией

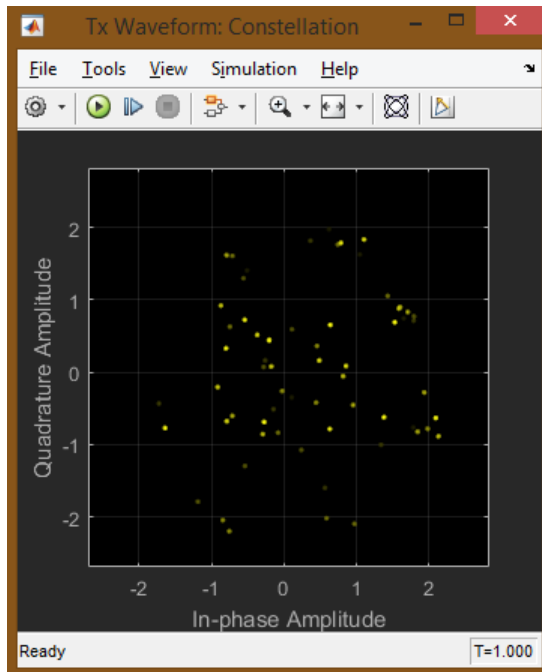


Рис. 5.31. Сгенерированный базовой станцией сигнал на I-Q диаграмме.

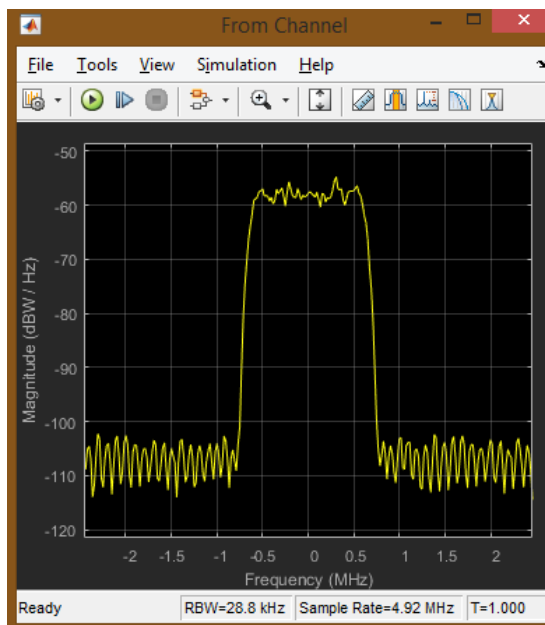


Рис. 5.32. Спектр сигнала после канала

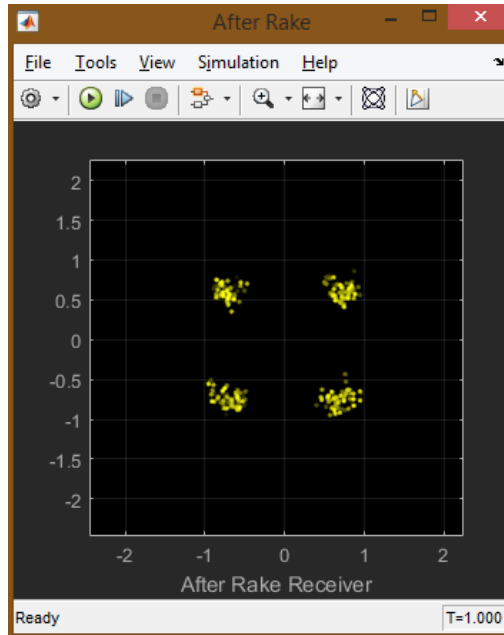


Рис. 5.33. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме  
 Видно, что спектр сигнала не изменился, так как в канале не было потерь. По результатам моделирования BER равен нулю.

В блоке Model Parameters во вкладке Channel Settings выберем Channel Model: AWGN Channel.

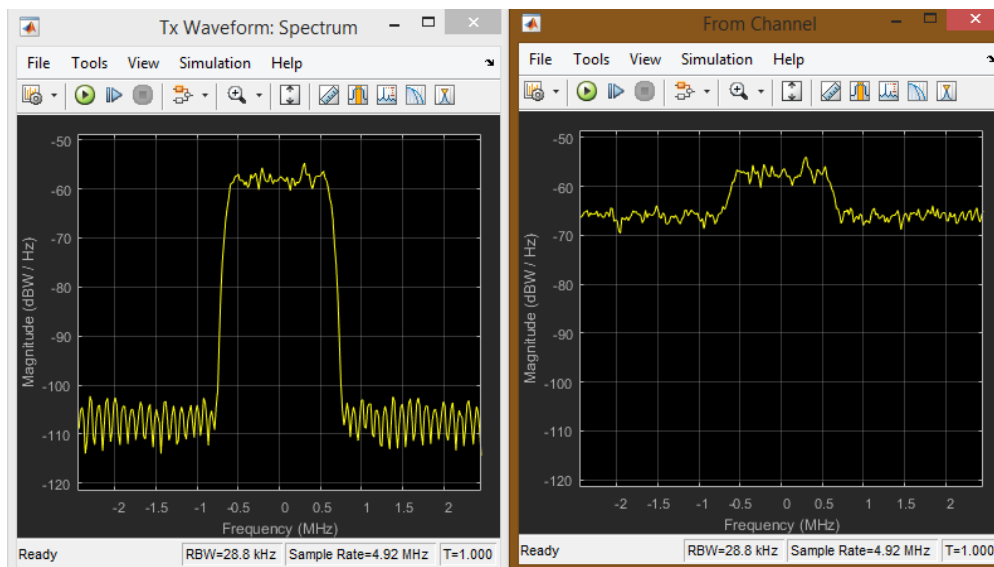


Рис. 5.34. Спектр сигнала до и после канала при отношении сигнал/шум 5 дБ



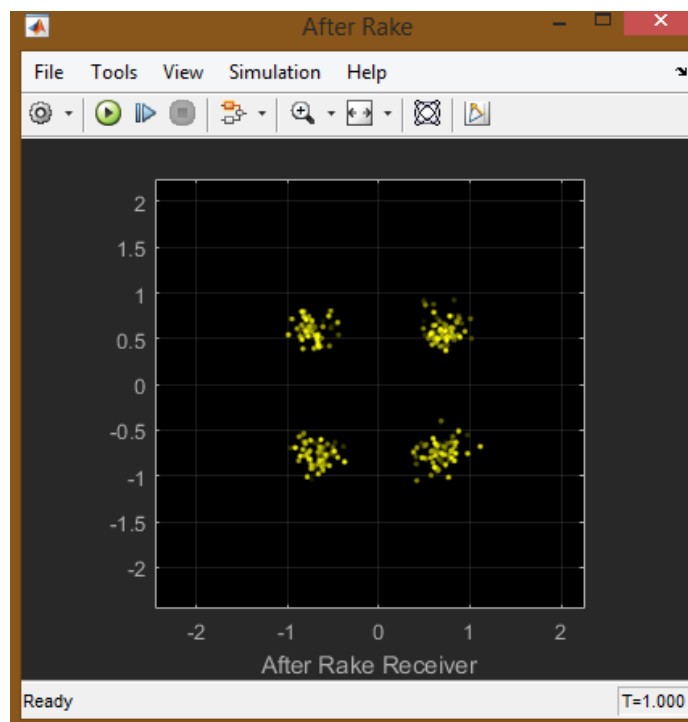


Рис. 5.35. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме.

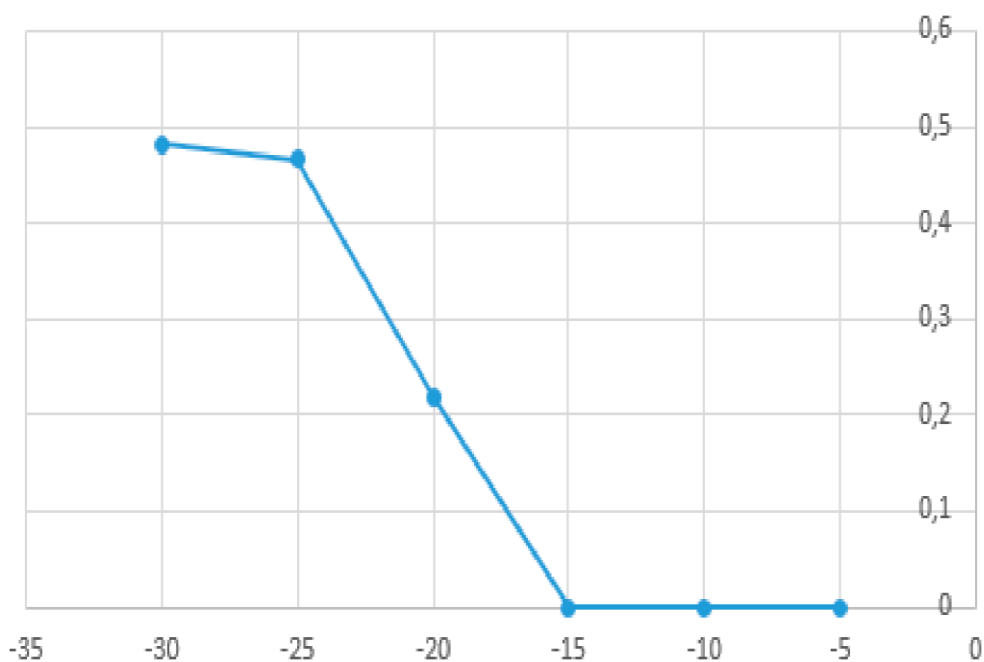


Рис. 5.36. Зависимость BER от SNR в канале с шумами.

Таблица 5.1. Зависимость BER от SNR в канале с шумами.

SNR	-30	-25	-20	-15	-10	-5
BER	0,4814	0,4662	0,2186	0	0	0

В блоке Model Parameters во вкладке Channel Settings выберем Channel Model: Multipath Fading Channel.

И установим следующие параметры

Maximum Doppler Frequency shift (in Hz):

450

Multipath Profile - Delay Vector (s):

[0 260e-9 521e-9 781e-9]

Multipath Profile - Gain Vector (dB):

[0 -3 -6 -9]

Рис. 5.37. Заданные параметры канала с многолучевым распространением.

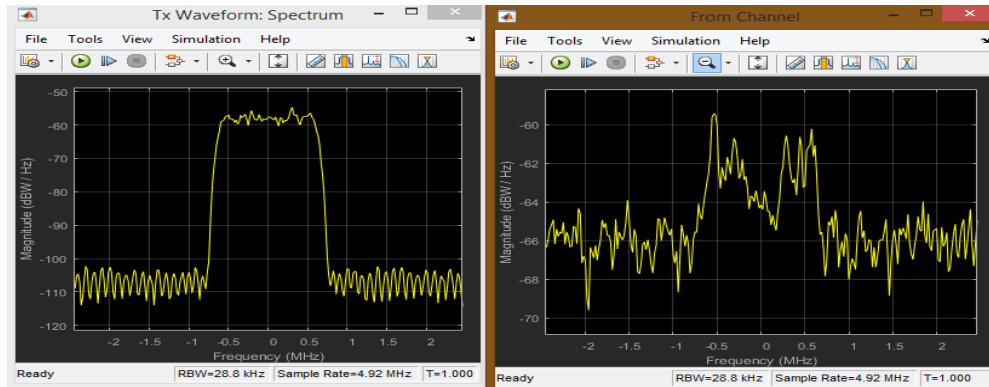


Рис. 5.38. Спектры сигнала до и после канала при отношении сигнал/шум 5 дБ.

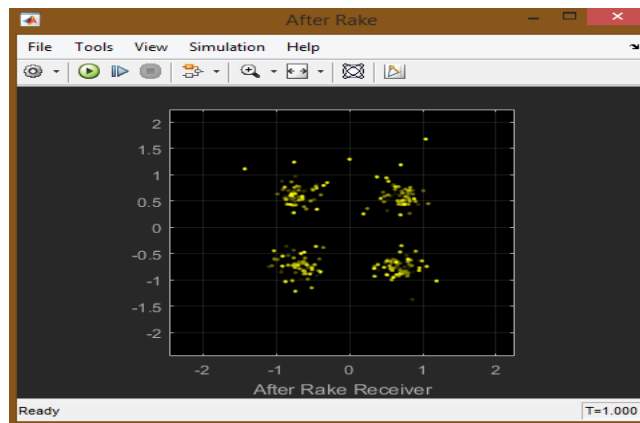


Рис. 5.39. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме.

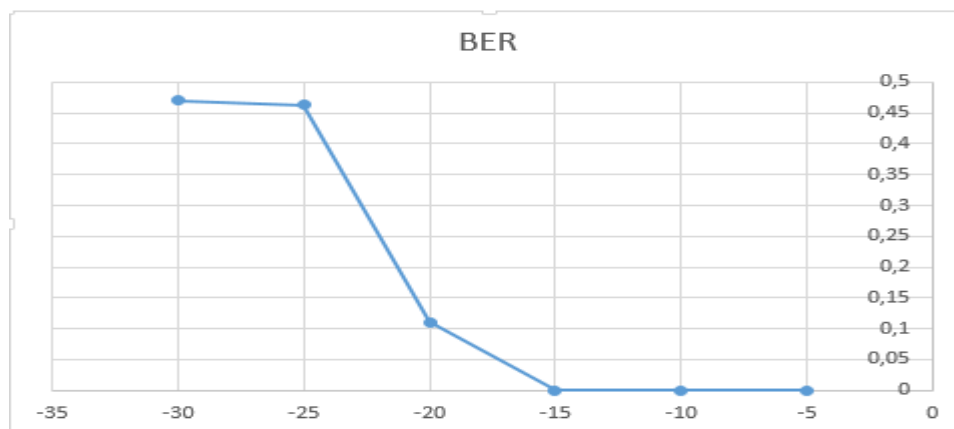


Рис. 5.40. Зависимость BER от SNR в канале с многолучевым распространением.

Таблица 5.2. Зависимость BER от SNR в канале с многолучевым распространением

SNR	-30	-25	-20	-15	-10	-5
BER	0,4708	0,4637	0,1105	0	0	0

--	--	--	--	--	--	--

В блоке Model Parameters во вкладке Channel Settings выберем Channel Model: Multipath Fading Channel.

И установим следующие параметры

Maximum Doppler Frequency shift (in Hz):

600

Multipath Profile - Delay Vector (s):

[0 280e-9 541e-9 801e-9]

Multipath Profile - Gain Vector (dB):

[0 -4 -7 -10]

Рис. 5.41. Заданные параметры канала с многолучевым распространением

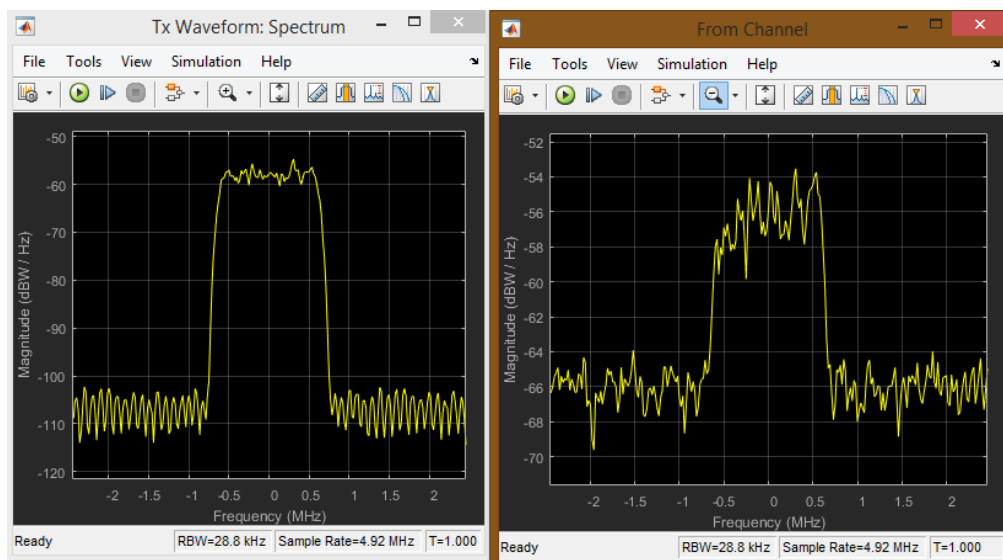


Рис. 5.42. Спектры сигнала до и после канала при отношении сигнал/шум 5 дБ

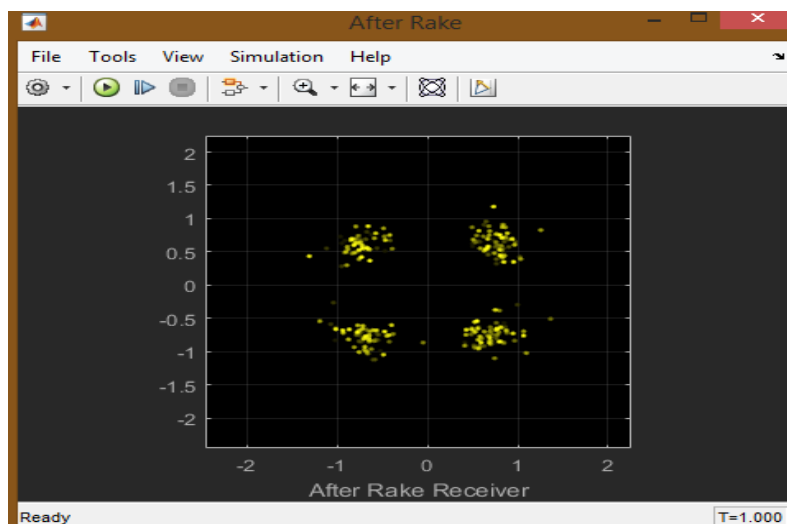


Рис. 5.43. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме

Таблица 5.3. Зависимость BER от SNR в канале с многолучевым распространением

SNR	-30	-25	-20	-15	-10	-5
BER	0,5007	0,4657	0,1532	0	0	0

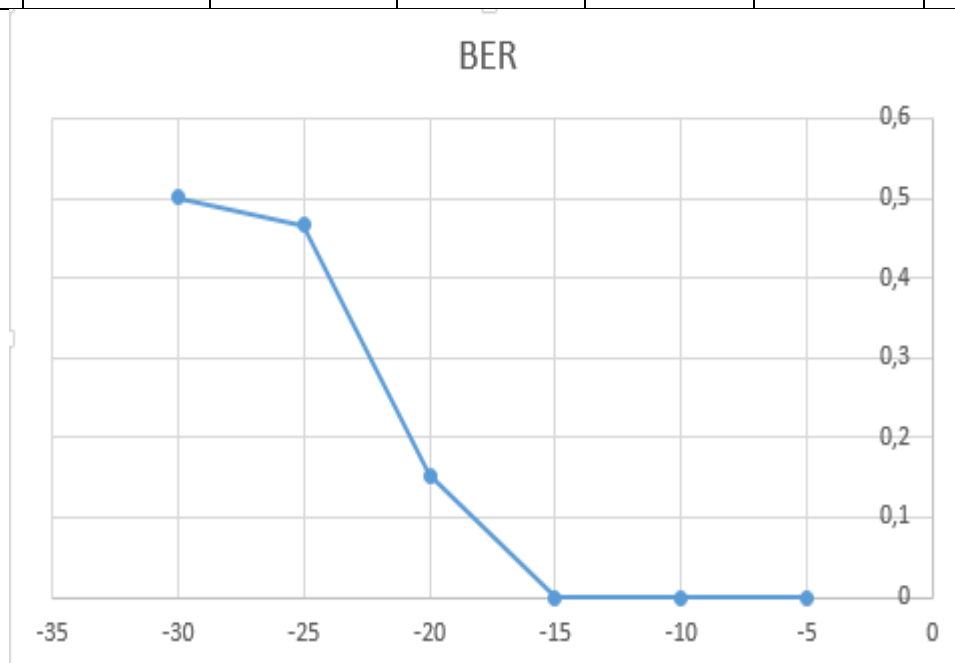


Рис. 5.44. Зависимость BER от SNR в канале с многолучевым распространением

Таким образом, в разделе было сделано:

1. Проведен аналитический обзор существующих методов и средств систем мобильной связи с кодовым разделением канала CDMA;
2. Разработана структурная схема DownLink канала CDMA2000 и приведена в приложении Б;
3. Приведена модель DownLink канала CDMA2000 реализованная в MATLAB R2015b;
4. Приведено исследование данной модели, а также методика проведения исследования, представленная в приложении А. Данную методику можно использовать для проведения учебных лабораторных работ.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Система мобильной связи CDMA2000 обладает рядом преимуществ: возможность декодировать сигналы при отношении сигнал/шум меньше единицы, т.е. уровень передаваемого сигнала ниже уровня шума, что делает сигнал скрытным, а значит более защищенным.
2. Формируемый сигнал возможно принять и декодировать без ошибок даже при наличии многолучевости, однако при большом Доплеровском отклонении частоты и больших задержках, например, 1МГц и 1 мкс ошибки будут даже при высоком

отношении сигнал/шум, например, 40 дБ. Но такие плохие характеристики канала довольно редки.

3. Для большей защищенности в аппаратуре стандарта CDMA длинный код формируется в результате нескольких последовательных логических операций с псевдослучайной двоичной последовательностью, генерируемой в 42-разрядном регистре сдвига, и двоичной 32-битовой маской, которая определяется индивидуально для каждого абонента. Такой регистр сдвига применяется во всех базовых станциях этого стандарта для обеспечения режима синхронизации всей сети. Длина M-последовательности при этом составляет 4 398 046 511 103 бит и если ее элементы формируются с тактовой частотой, например, 450 МГц, то период повторения будет составлять 9773,44 с = 2 ч 43 мин. Это значит, что если даже удастся засинхронизировать приемник в случае несанкционированного перехвата, то чтобы определить структуру сигнала-носителя необходимо вести наблюдение в течение почти 3-х часов, а с применением индивидуальной 32-битовой маски "подслушивание" практически исключено.

Таблица 5.4. Характеристики CDMA2000

Характеристика	Значение
Базовая скорость передачи данных в канале	9.6 кбит/с
Длительность пакетов, на которые разбивается базовый поток	20 мс
Цифровая модуляция DownLink	QPSK
Цифровая модуляция UpLink	OQPSK
Размер матрицы Адамара	64x64
Разрядность регистра сдвига для формирования длинного кода	42
Длина M-последовательности длинного кода	4 398 046 511 103
Количество бит в индивидуальной маске пользователя	32
Разрядность регистра сдвига для формирования короткого кода	15
Длина M-последовательности короткого кода	32768
Частота среза КИХ-фильтра	615 кГц

Методика проведения измерений работы:

1. Запустить MATLAB R2015b от имени администратора;
2. В командной строке ввести команду «cdma2000SimulinkExample»;
3. Два раза кликнуть левой кнопкой мыши по блоку Model Parameters;
4. Во вкладке Channel Settings выбрать Channel Model: No Channel;
5. Два раза кликнуть левой кнопкой мыши по блоку Open Scopes;
6. Запустить моделирование;
7. После отображения всех графиков сохранить полученные данные и убедиться, что спектр сигнала, до и после канала, не изменился;
8. Не закрывая окна с графиками два раза кликнуть левой кнопкой мыши по блоку Model Parameters;
9. Во вкладке Channel Settings выбрать Channel Model: AWGN Channel и изменяя значение отношения сигнал/шум построить зависимость BER от SNR, и сохранить полученные диаграммы хотя бы для одного измерения;
10. Не закрывая окна с графиками два раза кликнуть левой кнопкой мыши по блоку Model Parameters;
11. Во вкладке Channel Settings выбрать Channel Model: Multipath Fading Channel и изменяя значение отношения сигнал/шум построить зависимость BER от SNR, и сохранить полученные диаграммы хотя бы для одного измерения;
12. Не закрывая окна с графиками два раза кликнуть левой кнопкой мыши по блоку Model Parameters;
13. Во вкладке Channel Settings изменить параметры доплеровского отклонения частоты (Maximum Doppler Frequency shift), вектора задержки (Multipath Profile – Delay Vector), вектора усиления (Multipath Profile – Gain Vector) и повторить пункт 11. Длины векторов задержки и усиления должны совпадать!

### **5.3. Проектирование защищенной системы мобильной связи стандарта IEEE 802.11 (WiFi) [25]**

На современном этапе развития сетевых технологий, технология беспроводных сетей Wi-Fi является наиболее удобной в условиях, требующих мобильность, простоту установки и использования. Как правило, технология Wi-Fi используется для организации беспроводных локальных компьютерных сетей, а также создания так называемых горячих точек высокоскоростного доступа в Интернет.

Беспроводные сети обладают, по сравнению с традиционными проводными сетями, немалыми преимуществами, главным из которых, конечно же, является:

- Простота развёртывания;

- Гибкость архитектуры сети, когда обеспечивается возможность динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;

- Быстрота проектирования и реализации, что критично при жестких требованиях к времени построения сети;

В то же время беспроводные сети на современном этапе их развития не лишены серьёзных недостатков. Прежде всего, это зависимость скорости соединения и радиуса действия от наличия преград и от расстояния между приёмником и передатчиком. Один из способов увеличения радиуса действия беспроводной сети заключается в создании распределённой сети на основе нескольких точек беспроводного доступа. При создании таких сетей появляется возможность превратить здание в единую беспроводную зону и увеличить скорость соединения вне зависимости от количества стен (преград). Аналогично решается и проблема масштабируемости сети, а использование внешних направленных антенн позволяет эффективно решать проблему препятствий, ограничивающих сигнал.

**В соответствии с техническим заданием основными задачами данной работы являлись:**

1. Аналитический обзор существующих методов и средств;
2. Разработка структурной схемы программного комплекса;
3. Разработка алгоритма программы;
4. Разработка программного интерфейса для исследования характеристик и визуализации основных преобразований;
5. Разработка методики и проведение исследования основных технических характеристик, анализ результатов исследования.

Полученная в результате разработка позволяет исследовать беспроводные сети на базе стандарта 802.11b.

### **История развития**

В 1990 г. Комитет по стандартам IEEE 802 (Institute of Electrical and Electronic Engineers) сформировал рабочую группу по стандартам для беспроводных локальных сетей 802.11. Это группа занялась разработкой всеобщего стандарта для радиооборудования и сетей, работающих на частоте 2.4 ГГц со скоростями 1 и 2 Мбит/с. Работа по созданию стандарта были завершены через семь лет, и в июне 1997 г. была ратифицирована первая спецификация 802.11 [1].

Стандарт IEEE 802.11 стал первым стандартом для продуктов WLAN от независимой международной организации. Однако к моменту выхода стандарта в свет первоначально заложенная в нем скорость передачи данных оказалась недостаточной.

Это послужило причиной последующих доработок, поэтому сегодня можно говорить о группе стандартов.

### **Методы построения радиосигнала в WiFi-сетях**

В настоящее время при разработке аппаратуры для беспроводных сетей используются два метода построения сигнала:

1. С непосредственной модуляцией несущей частоты (Direct-Sequence Spread Spectrum – DSSS).

Информационный сигнал домножается на псевдослучайный код (Pncode – Pseudo Random Noise Code). Полученный результат используют для модуляции несущей. В приемнике полученный сигнал умножают на тот же код и выделяют полезный сигнал.

Основной проблемой, возникающей при использовании метода прямой последовательности, является эффект близко расположенного передатчика, т.е. уровень сигнала мешающего передатчика гораздо выше уровня нужного передатчика, что может привести к потере связи.

2. Со скачкообразной перестройкой частоты (Frequency-Hopping Spread Spectrum – FHSS).

Частота несущей изменяется согласно уникальной последовательности. Для реализации этого метода необходим скоростной синтезатор частот.

Недостаток: сложность получения высокого значения базы сигнала, что необходимо для увеличения числа пользователей, помехоустойчивости, повышения конфиденциальности.

Достоинство: меньшая подверженность эффекту близкого передатчика.

Оба метода основаны на принципе приемопередачи с «расширенным спектром», который обеспечивает защиту от помех и конфиденциальность передаваемой информации. Обычно при выборе сетевого продукта учитывают следующие факторы: скорость передачи данных, дальность устойчивой связи, соответствие стандартам, эксплуатационные характеристики и стоимость. Выбор типа аппаратуры для беспроводной сети определяется как условиями эксплуатации, так и стоимостью изделия. Следует отметить, что устройства, работающие по методу FHSS, можно получить миниатюрный и недорогой адаптер для портативного ПК [2].

### **Описание стандарта**

Из всех существующих стандартов беспроводной передачи данных IEEE 802.11 на практике чаще всего используются всего три стандарта, определенные Инженерным институтом электротехники и радиоэлектроники (IEEE): 802.11b, 802.11a и 802.11g.



В стандарте IEEE 802.11b благодаря высокой скорости передачи данных (до 11 Мбит/с), практически эквивалентной пропускной способности обычных проводных локальных сетей Ethernet, а также ориентации на диапазон 2,4 ГГц, этот стандарт завоевал наибольшую популярность у производителей оборудования для беспроводных сетей.

Поскольку оборудование, работающее на максимальной скорости 11 Мбит/с, имеет меньший радиус действия, чем на более низких скоростях, стандартом 802.11b предусмотрено автоматическое снижение скорости при ухудшении качества сигнала.

Стандарт IEEE 802.11a имеет большую ширину полосы из семейства стандартов 802.11 при скорости передачи данных до 54 Мбит/с.

В отличие от базового стандарта, ориентированного на область частот 2,4 ГГц, спецификациями 802.11a предусмотрена работа в диапазоне 5 ГГц. В качестве метода модуляции сигнала выбрано ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM).

К недостаткам 802.11a относятся более высокая потребляемая мощность радиопередатчиков для частот 5 ГГц, а также меньший радиус действия.

Стандарт IEEE 802.11g является логическим развитием 802.11b и предполагает передачу данных в том же частотном диапазоне. Кроме того, стандарт 802.11g полностью совместим с 802.11b, то есть любое устройство 802.11g должно поддерживать работу с устройствами 802.11b. Максимальная скорость передачи в стандарте 802.11g составляет 54 Мбит/с, поэтому на сегодня это наиболее перспективный стандарт беспроводной связи.

При разработке стандарта 802.11g рассматривались две отчасти конкурирующие технологии: метод ортогонального частотного разделения OFDM и метод двоичного пакетного сверточного кодирования PBCC, опционально реализованный в стандарте 802.11b. В результате стандарт 802.11g содержит компромиссное решение: в качестве базовых применяются технологии OFDM и ССК, а опционально предусмотрено использование технологии PBCC.

### **Физические уровни стандарта**

Основное назначение физических уровней стандарта 802.11 - обеспечить механизмы беспроводной передачи для подуровня MAC, а также поддерживать выполнение вторичных функций, таких как оценка состояния беспроводной среды и сообщение о нем подуровню MAC. Уровни MAC и PHY разрабатывались так, чтобы они были независимыми. Именно независимость между MAC и подуровнем PHY и позволила использовать дополнительные

высокоскоростные физические уровни, описанные в стандартах 802.11b, 802.11a и 802.11g.

Каждый из физических уровней стандарта 802.11 имеет два подуровня:

- Physical Layer Convergence Procedure (PLCP). Процедура определения состояния физического уровня.
- Physical Medium Dependent (PMD). Подуровень физического уровня, зависящий от среды передачи.

На рис.1 показано, как эти подуровни соотносятся между собой и с вышестоящими уровнями в модели взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection - OSI).

Подуровень PLCP по существу является уровнем обеспечения взаимодействия, на котором осуществляется перемещение элементов данных протокола MAC (MAC Protocol Data Units - MPDU) между MAC-станциями с использованием подуровня PMD, на котором реализуется тот или иной метод передачи и приема данных через беспроводную среду. Подуровни PLCP и PMD отличаются для разных вариантов стандарта 802.11.

Перед тем как приступить к изучению физических уровней, рассмотрим одну из составляющих физического уровня, до сих пор не упомянутую, а именно - скремблирование.

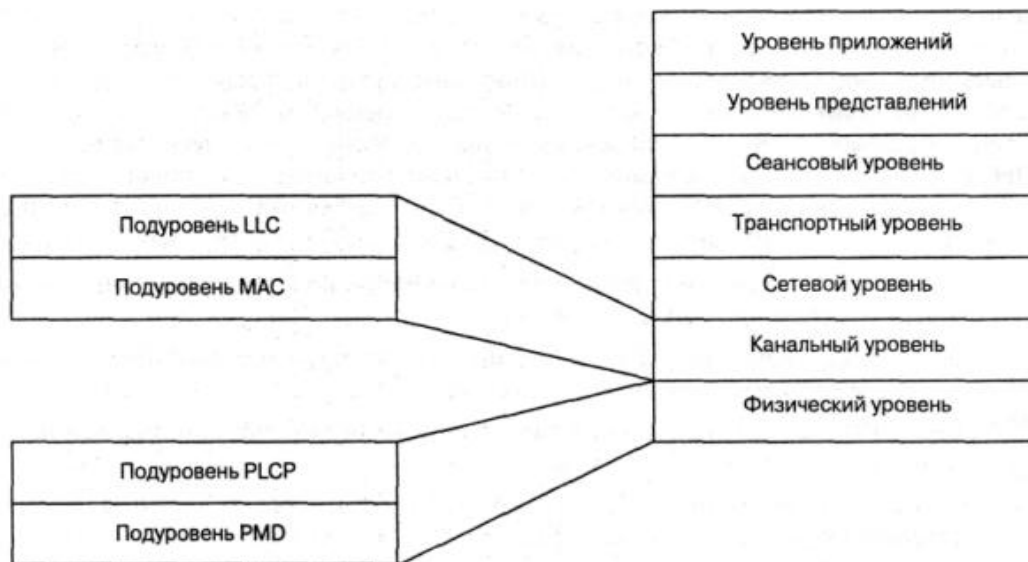


Рис. 5.45. Подуровни уровня РНУ

Одна из особенностей, лежащих в основе современных передатчиков, благодаря которой данные можно передавать с высокой скоростью, - это предположение о том, что данные, которые предлагаются для передачи, поступают, с точки зрения передатчика, случайным образом. Без этого предположения многие преимущества,

получаемые за счет применения остальных составляющих физического уровня, остались бы нереализованными.

Однако бывает, что принимаемые данные не вполне случайны и на самом деле могут содержать повторяющиеся наборы и длинные последовательности нулей и единиц.

Скрэмблирование (перестановка элементов) - это метод, посредством которого принимаемые данные делаются более похожими на случайные; достигается это путем перестановки битов последовательности таким образом, чтобы превратить ее из структурированной в похожую на случайную. Эту процедуру иногда называют "отбеливанием потока данных". Дескрэмблер приемника затем выполняет обратное преобразование этой случайной последовательности с целью получения исходной структурированной последовательности. Большинство способов скрэмблирования относится к числу самосинхронизирующихся; это означает, что дескрэмблер способен самостоятельно синхронизироваться со скрэмблером.

### **IEEE 802.11**

Исходный стандарт 802.11 определяет три метода передачи на физическом уровне:

- Передача в диапазоне инфракрасных волн.
- Технология расширения спектра путем скачкообразной перестройки частоты (FHSS) в диапазоне 2,4 ГГц.
- Технология широкополосной модуляции с расширением спектра методом прямой последовательности (DSSS) в диапазоне 2,4 ГГц.

#### *Передача в диапазоне инфракрасных волн*

Средой передачи являются инфракрасные волны диапазона 850 нм, которые генерируются либо полупроводниковым лазерным диодом, либо светодиодом (LED). Так как инфракрасные волны не проникают через стены, область покрытия LAN ограничивается зоной прямой видимости. Стандарт предусматривает три варианта распространения излучения: ненаправленную антенну, отражение от потолка и фокусное направленное излучение. В первом случае узкий луч рассеивается с помощью системы линз. Фокусное направленное излучение предназначено для организации двухточечной связи, например между двумя зданиями.

#### *Беспроводные локальные сети со скачкообразной перестройкой частоты (FHSS)*

Беспроводные локальные сети FHSS поддерживают скорости передачи 1 и 2 Мбит/с. Устройства FHSS делят предназначенную для их работы полосу частот от 2,402 до 2,480 ГГц на 79 неперекрывающихся каналов (это справедливо для Северной Америки и большей части Европы). Ширина каждого из 79 каналов составляет 1 МГц,

поэтому беспроводные локальные сети FHSS используют относительно высокую скорость передачи символов - 1 МГц - и намного меньшую скорость перестройки с канала на канал.

Последовательность перестройки частоты должна иметь следующие параметры: частота перескоков не менее 2,5 раз в секунду как минимум между шестью (6 МГц) каналами. Чтобы минимизировать число коллизий между перекрывающимися зонами покрытия, возможные последовательности перескоков должны быть разбиты на три набора последовательностей, длина которых для Северной Америки и большей части Европы составляет 26. В [таблице 1](#) представлены схемы скачкообразной перестройки частоты, обеспечивающие минимальное перекрытие.

По сути, схема скачкообразной перестройки частоты обеспечивает неторопливый переход с одного возможного канала на другой таким образом, что после каждого скачка покрывается полоса частот, равная как минимум 6 МГц, благодаря чему в многосотовых сетях минимизируется возможность возникновения коллизий.

Таблица 5.5 - Схема FHSS для Северной Америки и Европы	
Набор	Схема скачкообразной перестройки частоты
1	{0,3,6,9,12,15,18,21,24,27,30,33,36,39,42,45,48,51,54,57,60,63,66,69,72,75}
2	{1,4,7,10,13,16,19,22,25,28,31,34,37,40,43,46,49,52,55,58,61,64,67,70,73,76}
3	{2,5,8,11,14,17,20,23,26,29,32,35,38,41,44,47,50,53,56,59,62,65,68,71,74,77}

После того как уровень MAC пропускает MAC-фрейм, который в локальных беспроводных сетях FHSS называется также служебным элементом данных PLCP, или PSDU (PLCP Service Data Unit), подуровень PLCP добавляет два поля в начало фрейма, чтобы сформировать таким образом фрейм PPDU (PPDU - элемент данных протокола PLCP). На [рис.2](#) представлен формат фрейма FHSS подуровня PLCP.

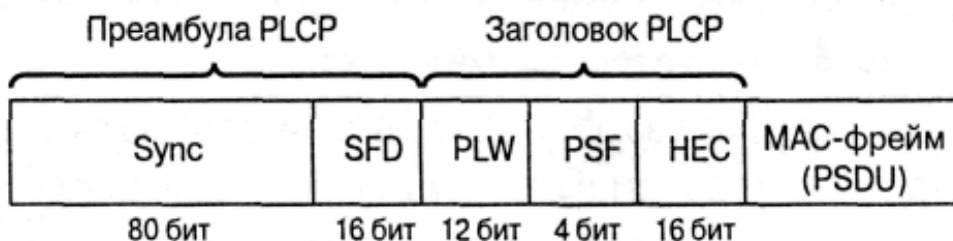


Рис. 5.46. Формат фрейма FHSS подуровня PLCP

Преамбула PLCP состоит из двух подполей:

- Подполе Sync размером 80 бит. Строка, состоящая из чередующихся 0 и 1, начинается с 0. Приемная станция использует это поле, чтобы принять решение о выборе антенны при наличии такой возможности, откорректировать уход частоты (frequency offset) и синхронизировать распределение пакетов (packet timing).

- Подполе флага начала фрейма (Start of Frame Delimiter, SFD) размером 16 бит. Состоит из специфической строки ( 0000 1100 1011 1101, крайний слева бит первый) в обеспечение синхронизации фреймов (frame timing) для приемной станции.

Заголовок фрейма PLCP состоит из трех подполей:

- Слово длины служебного элемента данных PLCP (PSDU), PSDU Length Word (PLW) размером 12 бит. Указывает размер фрейма MAC (PSDU) в октетах.
- Сигнальное поле PLCP (Signaling Field PLCP - PSF) размером 4 бит. Указывает скорость передачи данных конкретного фрейма.
- НЕС (Header Error Check). Контрольная сумма фрейма.

Служебный элемент данных PLCP (PSDU) проходит через операцию скремблирования с целью отбеливания (рандомизации) последовательности входных битов. Получившийся в результате PSDU представлен на рис.3. Заполняющие символы вставляются между всеми 32-символьными блоками. Эти заполняющие символы устраняют любые систематические отклонения в данных, например, когда единиц больше, чем нулей, или наоборот, которые могли бы привести к нежелательным эффектам при дальнейшей обработке.

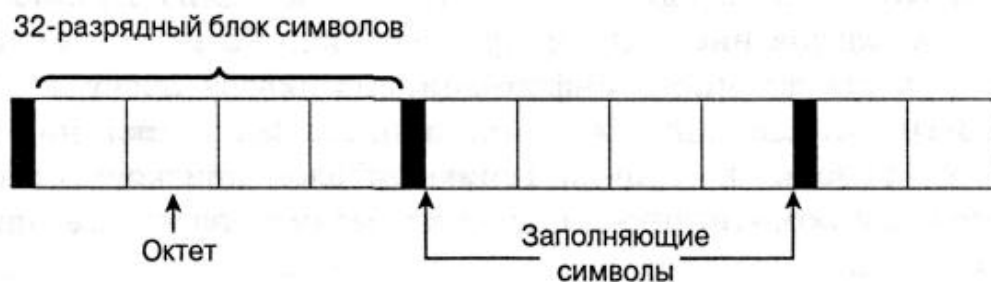


Рис. 5.47. Скремблированный PSDU в технологии FHSS

Подуровень PLCP преобразует фрейм в поток битов и передает его на подуровень PMD. Подуровень PMD технологии FHSS модулирует поток данных с использованием модуляции, основанной на гауссовой частотной модуляции (Gaussian Frequency Shift Keying - GFSK).

*Беспроводные локальные сети, использующие широкополосную модуляцию DSSS с расширением спектра методом прямой последовательности*

В спецификации стандарта 802.11 оговорено использование и другого физического уровня - на основе технологии широкополосной модуляции с расширением спектра методом прямой последовательности (DSSS). Как было указано в стандарте 802.11 разработки 1997 года, технология DSSS поддерживает скорости передачи 1 и 2 Мбит/с.

Аналогично подуровню PLCP, используемому в технологии FHSS, подуровень PLCP технологии DSSS стандарта 802.11 добавляет два поля во фрейм MAC, чтобы

сформировать PDU: преамбулу PLCP и заголовок PLCP. Формат фрейма представлен на рис.5.48.



Рис. 5.48. Формат фрейма DSSS подуровня PLCP

Преамбула PLCP состоит из двух подполей:

- Подполе Sync шириной 128 бит, представляющее собой строку, состоящую из единиц. Задача этого подполя - обеспечить синхронизацию для приемной станции.
- Подполе SFD шириной 16 бит; в нем содержится специфичная строка 0xF3A0; его задача - обеспечить тайминг (timing) для приемной станции.

Заголовок PLCP состоит из четырех подполей:

- Подполе Signal шириной 8 бит, указывающее тип модуляции и скорость передачи для данного фрейма.
- Подполе Service шириной 8 бит зарезервировано. Это означает, что во время разработки спецификации стандарта оно осталось неопределенным; предполагается, что оно пригодится в будущих модификациях стандарта.
- Подполе Length шириной 16 бит, указывающее количество микросекунд (из диапазона 16-216), необходимое для передачи части MAC-фрейма.
- Подполе CRC. 16-битная контрольная сумма.

Подуровень PLCP преобразует фрейм в поток битов и передает данные на подуровень PMD. Весь PDU проходит через процесс скремблирования с целью рандомизации данных.

Скремблированная преамбула PLCP всегда передается со скоростью 1 Мбит/с, в то время как скремблированный фрейм MPDU передается со скоростью, указанной в подполе Signal. Подуровень PMD модулирует отбеленный поток битов, используя следующие методы модуляции:

- Двоичная относительная фазовая модуляция (Differential Binary Phase Shift Keying - DBPSK) для скорости передачи 1 Мбит/с.
- Квадратурная относительная фазовая модуляция (Differential Quadrature Phase Shift Key - DQPSK) для скорости передачи 2 Мбит/с.

На физическом уровне к MAC-кадрам (MPDU) добавляется заголовок физического уровня, состоящий из преамбулы и собственно PLCP-заголовка (рис.5.5).

Преамбула содержит стартовую синхропоследовательность (SYNC) для настройки приемника и 16-битный код начала кадра (SFD) - число F3A016. PLCP-заголовок включает поля SIGNAL (информация о скорости и типе модуляции), SERVICE (дополнительная информация, в том числе о применении высокоскоростных расширений и PBCC-модуляции) и LENGTH (время в микросекундах, необходимое для передачи следующей за заголовком части кадра). Все три поля заголовка защищены 16-битной контрольной суммой CRC.

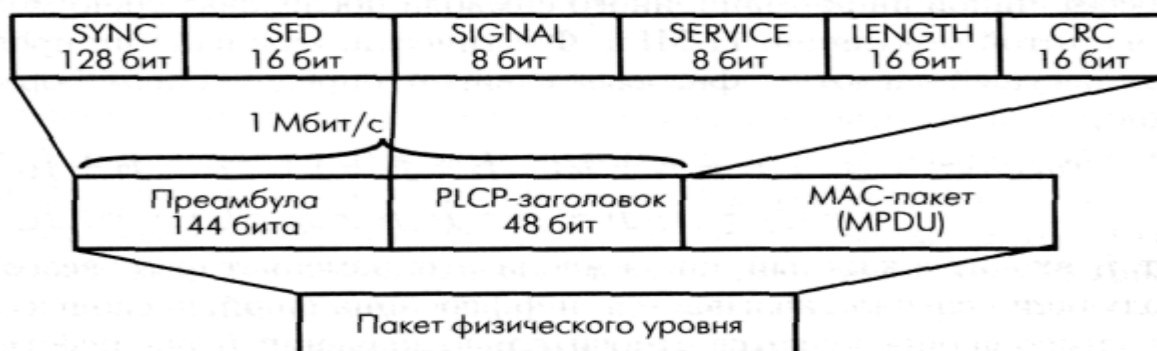


Рис. 5.49. Структура кадров сети IEEE 802.11b физического уровня

В стандарте IEEE 802.11b предусмотрено два типа заголовков: длинный и короткий (51).



Рис. 5.50. Короткий заголовок кадров сети 802.11b

Они отличаются длиной синхропоследовательности (128 и 56 бит), способом ее генерации, а также тем, что символ начала кадра в коротком заголовке передается в обратном порядке. Кроме того, если все поля длинного заголовка передаются со скоростью 1 Мбит/с, то при коротком заголовке преамбула транслируется на скорости 1 Мбит/с, другие поля заголовка - со скоростью 2 Мбит/с. Остальную часть кадра можно передавать на любой из допустимых стандартом скоростей передачи, указанных в полях SIGNAL и SERVICE. Короткие заголовки физического уровня предусмотрены спецификацией IEEE 802.11b для увеличения пропускной способности сети.

Из описания процедур связи сети IEEE 802.11 видно, что "накладные расходы" в этом стандарте выше, чем в проводной сети Ethernet. Поэтому крайне важно обеспечить высокую скорость передачи данных в канале. Повысить пропускную способность канала с заданной шириной полосы частот можно, разрабатывая и применяя новые методы модуляции. По этому пути пошла группа разработчиков IEEE 802.11b.

Напомним, что изначально стандарт IEEE 802.11 предусматривал работу в режиме DSSS с использованием так называемой Баркеровской последовательности (Barker) длиной 11 бит:  $B1 = (10110111000)$ . Каждый информационный бит замещается своим произведением по модулю 2 (операция "исключающее ИЛИ") с данной последовательностью, т. е. каждая информационная единица заменяется на B1, каждый ноль - на инверсию B1. В результате бит заменяется последовательностью 11 чипов. Далее сигнал кодируется посредством дифференциальной двух- или четырехпозиционной фазовой модуляции (DBPSK или DQPSK, один или два чипа на символ соответственно). При частоте модуляции несущей 11 МГц общая скорость составляет в зависимости от типа модуляции 1 и 2 Мбит/с.

Стандарт IEEE 802.11b дополнительно предусматривает скорости передачи 11 и 5,5 Мбит/с. Для этого используется так называемая ССК-модуляция (Complementary Code Keying - кодирование комплементарным кодом).

Хотя механизм расширения спектра, используемый для получения скоростей 5,5 и 11 Мбит/с с применением ССК, относится к методам, которые применяются для скоростей 1 и 2 Мбит/с, он по-своему уникален. В обоих случаях применяется метод расширения, но при использовании модуляции ССК расширяющий код представляет собой код из 8 комплексных чипов, в то время как при работе со скоростями 1 и 2 Мбит/с применяется 11-разрядный код. 8-чиповый код определяется или 4, или 8 битами - в зависимости от скорости передачи данных. Скорость передачи чипов составляет 11 Мчип/с, т.е. при 8 комплексных чипах на символ и 4 или 8 битов на символ можно добиться скорости передачи данных 5,5 и 11 Мбит/с.

Для того чтобы передавать данные со скоростью 5,5 Мбит/с, нужно сгруппировать скремблированный поток битов в символы по 4 бита ( $b_0, b_1, b_2$  и  $b_3$ ). Последние два бита ( $b_2$  и  $b_3$ ) используются для определения 8 последовательностей комплексных чипов, как показано в таблице б, где  $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8\}$  представляют чипы последовательности. В таблицн б<sub>j</sub> представляет мнимое число, корень квадратный из -1, и откладывается по мнимой, или квадратурной, оси комплексной плоскости.



Таблица 5.6. Последовательность чипов ССК								
(b2, b3)	1	2	3	4	5	6	7	C8
00				1			1	1
01	j	1	j				j	1
10	j		j	1	j			1
11		1			j			1

Теперь, имея последовательность чипов, определенную битами (b2, b3), можно использовать первые два бита (b0, b1) для определения поворота фазы, осуществляемого при модуляции по методу DQPSK, который будет применен к последовательности (таблица 3). Вы должны также пронумеровать каждый 4-битовый символ PSDU, начиная с 0, чтобы можно было определить, преобразуете вы четный либо нечетный символ в соответствии с этой таблицей. Следует помнить, что речь идет об использовании DQPSK, а не QPSK, и поэтому представленные в таблице изменения фазы отсчитываются по отношению к предыдущему символу или, в случае первого символа PSDU, по отношению к последнему символу предыдущего DQPSK-символа, передаваемого со скоростью 2 Мбит/с.

Таблица 5.7. Поворот фазы при модуляции ССК		
(b0, b1)	Изменение фазы четных символов	Изменение фазы нечетных символов
00	0	$\pi$
01	$\pi/2$	$-\pi/2$
11	$\pi$	0
10	$-\pi/2$	$\pi/2$

Это вращение фазы применяется по отношению к 8 комплексным чипам символа, затем осуществляется модуляция на подходящей несущей частоте.

Чтобы передавать данные со скоростью 11 Мбит/с, скремблированная последовательность битов PSDU разбивается на группы по 8 символов. Последние 6 битов выбирают одну последовательность, состоящую из 8 комплексных чипов, из числа 64 возможных последовательностей, почти так же, как использовались биты (b2,

b3) для выбора одной из четырех возможных последовательностей. Биты (b0,b1) используются таким же образом, как при модуляции ССК на скорости 5,5 Мбит/с для вращения фазы последовательности и дальнейшей модуляции на подходящей несущей частоте.

В чем достоинство ССК-модуляции? Дело в том, что чипы символа определяются на основе последовательностей Уолша-Адамара. Последовательности Уолша-Адамара хорошо изучены, обладают отличными автокорреляционными свойствами. Что немаловажно, каждая такая последовательность мало коррелирует сама с собой при фазовом сдвиге - очень полезное свойство при борьбе с переотраженными сигналами. Нетрудно заметить, что теоретическое операционное усиление ССК-модуляции - 3 дБ (в два раза), поскольку без кодирования QPSK-модулированный с частотой 11 Мбит/с сигнал может транслировать 22 Мбит/с. Как видно, ССК-модуляция представляет собой вид блочного кода, а потому достаточно проста при аппаратной реализации. Совокупность этих свойств и обеспечила ССК место в стандарте IEEE 802.11b в качестве обязательного вида модуляции.

На практике важно не только операционное усиление. Существенную роль играет и равномерность распределения символов в фазовом пространстве - они должны как можно дальше отстоять друг от друга, чтобы минимизировать ошибки их детектирования. И с этой точки зрения ССК-модуляция не выглядит оптимальной, ее реальное операционное усиление не превышает 2 дБ. Поэтому изначально прорабатывался другой способ модуляции - пакетное бинарное сверточное кодирование PBCC (Packet Binary Convolutional Coding). Этот метод вошел в стандарт IEEE 802.11b как дополнительная (необязательная) опция. Механизм PBCC (5.51) позволяет добиваться в сетях IEEE 802.11b пропускной способности 5,5, 11 и 22 Мбит/с.

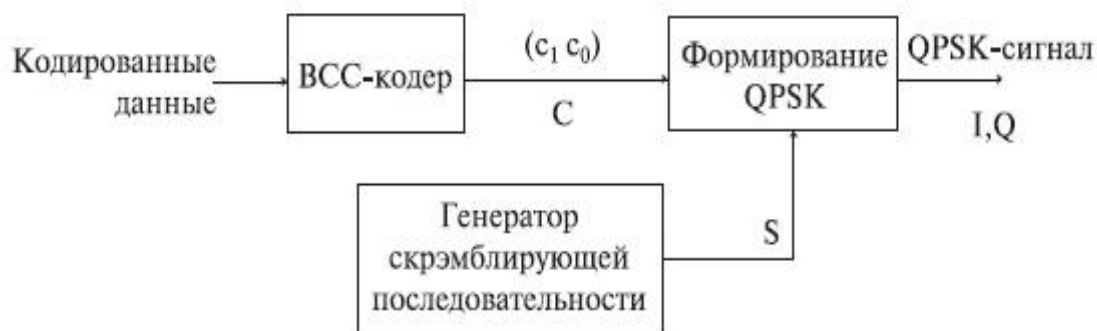


Рис. 5.51. Общая схема PBCC-модуляции

Как следует из названия, метод основан на сверточном кодировании. Для скоростей 5,5 и 11 Мбит/с поток информационных битов поступает в шестиразрядный сдвиговой регистр с сумматорами (5.52). В начальный момент

времени все триггеры сдвигового регистра инициализируют нулем. В результате каждый исходный бит  $d$  заменяется двумя битами кодовой последовательности ( $c_0, c_1$ ). При скорости 11 Мбит/с  $c_0$  и  $c_1$  задают один символ четырехпозиционной QPSK-модуляции. Для скорости 5,5 Мбит/с используют двухпозиционную BPSK-модуляцию, последовательно передавая кодовые биты  $c_0$  и  $c_1$ . Если же нужна скорость 22 Мбит/с, схема кодирования усложняется (рис.5.9): три кодовых бита ( $c_0$ - $c_2$ ) определяют один символ в 8-позиционной 8-PSK-модуляции.

После формирования PSK-символов происходит скремблирование. В зависимости от сигнала  $s$  (5.51) символ остается без изменений ( $s = 0$ ), либо его фаза увеличивается на  $\pi/2$  ( $s = 1$ ). Значение  $s$  определяет 256-битовая циклически повторяющаяся последовательность  $S$ . Она формируется на основе начального вектора  $U = 338Bh$ , в котором равное число нулей и единиц.

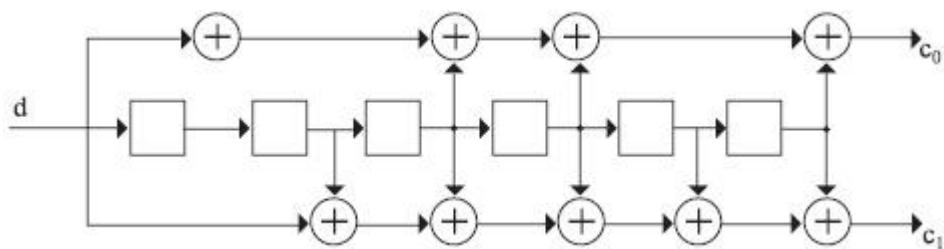


Рис. 5.52. Сверточное кодирование с двумя битами кодовой последовательности

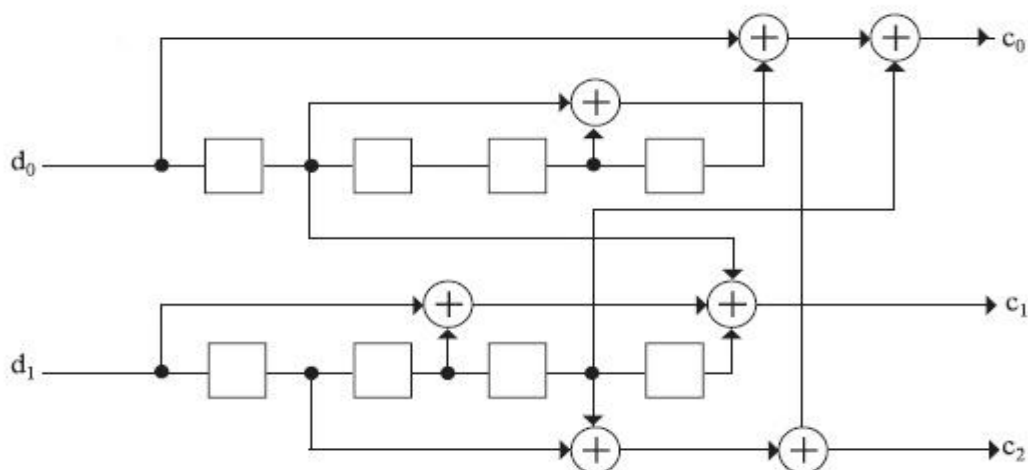


Рис. 5.53. Сверточное кодирование с тремя битами кодовой последовательности

У шестизрядного сдвигового регистра, применяемого в РВСС для скоростей 11 и 5,5 Мбит/с, 64 возможных выходных состояния. Так что при модуляции РВСС информационные биты в фазовом пространстве оказываются гораздо дальше

друг от друга, чем при ССК-модуляции. Поэтому РВСС и позволяет при одном и том же соотношении "сигнал-шум" и уровне ошибок вести передачу с большей скоростью, чем в случае ССК. Однако плата за более эффективное кодирование - сложность аппаратной реализации данного алгоритма.

### IEEE 802.11a

Стандарт IEEE 802.11a появился практически одновременно с IEEE 802.11b, в сентябре 1999 года. Эта спецификация была ориентирована на работу в диапазоне 5 ГГц и основана на принципиально ином, чем описано выше, механизме кодирования данных - на частотном мультиплексировании посредством ортогональных несущих (OFDM).

Стандарт 802.11a определяет характеристики оборудования, применяемого в офисных или городских условиях, когда распространение сигнала происходит по многолучевым каналам из-за множества отражений.

В IEEE 802.11a каждый кадр передается посредством 52 ортогональных несущих, каждая с шириной полосы порядка 300 КГц (20 МГц/64). Ширина одного канала - 20 МГц. Несущие модулируют посредством BPSK, QPSK, а также 16- и 64-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (QAM). В совокупности с различными скоростями кодирования (1/2 и 3/4, для 64-QAM - 2/3 и 3/4) образуется набор скоростей передачи 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 и 54 Мбит/с. В таблице 5.8 показано, как необходимая скорость передачи данных преобразуется в соответствующие параметры узлов передатчика OFDM.

Таблица 5.8. Параметры передатчика стандарта 802.11a

Скорость передачи данных (Мбит/с)	Модуляция	Скорость сверточного кодирования	Число канальных битов на поднесущую	Число канальных битов на символ	Число битов данных на символ OFDM
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Из 52 несущих 48 предназначены для передачи информационных символов, остальные 4 - служебные. Структура заголовков физического уровня отличается от принятого в спецификации IEEE 802.11b, но незначительно (рис.5.54).

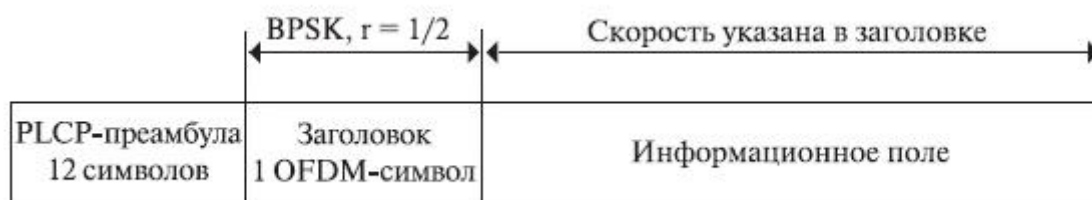


Рис. 5.54. Структура заголовка физического уровня стандарта IEEE 802.11a

Кадр включает преамбулу (12 символов синхропоследовательности), заголовок физического уровня (PLCP-заголовок) и собственно информационное поле, сформированное на MAC-уровне. В заголовке передается информация о скорости кодирования, типе модуляции и длине кадра. Преамбула и заголовок транслируются с минимально возможной скоростью (BPSK, скорость кодирования  $r = 1/2$ ), а информационное поле - с указанной в заголовке, как правило, максимальной, скоростью, в зависимости от условий обмена. OFDM-символы передаются через каждые 4 мкс, причем каждому символу длительностью 3,2 мкс предшествует защитный интервал 0,8 мкс (повторяющаяся часть символа). Последний необходим для борьбы с многолучевым распространением сигнала - отраженный и пришедший с задержкой символ попадет в защитный интервал и не повредит следующий символ.

Естественно, формирование/декодирование OFDM-символов происходит посредством быстрого преобразования Фурье (обратного/прямого, ОБПФ/БПФ). Функциональная схема трактов приема/передачи (рис. 5.54) достаточно стандартна для данного метода и включает сверточный кодер, механизм перемежения/перераспределения (защита от пакетных ошибок) и процессор ОБПФ. Фурье-процессор, собственно, и формирует суммарный сигнал, после чего к символу добавляется защитный интервал, окончательно формируется OFDM-символ и посредством квадратурного модулятора/конвертера переносится в заданную частотную область. При приеме все происходит в обратном порядке.

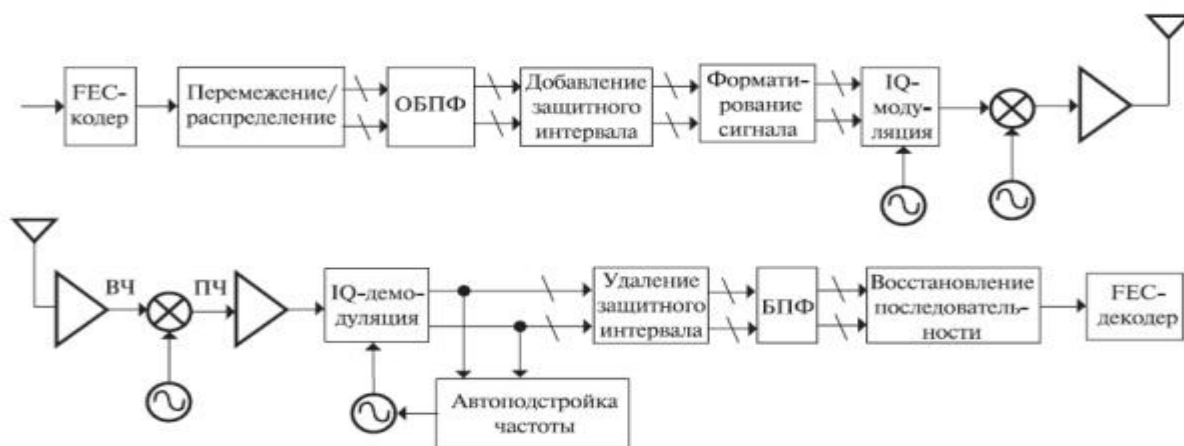


Рис. 5.55. Функциональная схема трактов приема/передачи стандарта IEEE 802.11a

### IEEE 802.11g

Стандарт IEEE 802.11g по сути представляет собой перенесение схемы модуляции OFDM, прекрасно зарекомендовавшей себя в 802.11a, из диапазона 5 ГГц в область 2,4 ГГц при сохранении функциональности устройств стандарта 802.11b. Это возможно, поскольку в стандартах 802.11 ширина одного канала в диапазонах 2,4 и 5 ГГц схожа - 22 МГц.

Одним из основных требований к спецификации 802.11g была обратная совместимость с устройствами 802.11b. Действительно, в стандарте 802.11b в качестве основного способа модуляции принята схема ССК (Complementary Code Keying), а в качестве дополнительной возможности допускается модуляция PBCC (Pocket Binary Convolutional Coding).

Разработчики 802.11g предусмотрели ССК-модуляцию для скоростей до 11 Мбит/с и OFDM для более высоких скоростей. Но сети стандарта 802.11 при работе используют принцип CSMA/CA - множественный доступ к каналу связи с контролем несущей и предотвращением коллизий. Ни одно устройство 802.11 не должно начинать передачу, пока не убедится, что эфир в его диапазоне свободен от других устройств. Если в зоне слышимости окажутся устройства 802.11b и 802.11g, причем обмен будет происходить между устройствами 802.11g посредством OFDM, то оборудование 802.11b просто не поймет, что другие устройства сети ведут передачу, и попытается начать трансляцию. Последствия очевидны.

Чтобы не допустить подобной ситуации, предусмотрена возможность работы в смешанном режиме - ССК-OFDM. Информация в сетях 802.11 передается кадрами. Каждый информационный кадр включает два основных поля: преамбулу с заголовком и информационное поле (рис.5.56).



Рис. 5.56. Кадры IEEE 802.11g в различных режимах модуляции

Преамбула содержит синхропоследовательность и код начала кадра, заголовок - служебную информацию, в том числе о типе модуляции, скорости и продолжительности передачи кадра. В режиме ССК-OFDM преамбула и заголовок модулируются методом ССК (реально - путем прямого расширения спектра DSSS посредством последовательности Баркера, поэтому в стандарте 802.11g этот режим именуется DSSS-OFDM), а информационное поле - методом OFDM. Таким образом, все устройства 802.11b, постоянно "прослушивающие" эфир, принимают заголовки кадров и узнают, сколько времени будет транслироваться кадр 802.11g. В этот период они "молчат". Естественно, пропускная способность сети падает, поскольку скорость передачи преамбулы и заголовка - 1 Мбит/с.

Видимо, данный подход не устраивал лагерь сторонников технологии PBCC, и для достижения компромисса в стандарт 802.11g в качестве дополнительной возможности ввели, так же как и в 802.11b, необязательный режим - PBCC, в котором заголовок и преамбула передаются так же, как и при ССК, а информационное поле модулируется по схеме PBCC и передается на скорости 22 или 33 Мбит/с. В результате устройства стандарта 802.11g должны оказаться совместимыми со всеми модификациями оборудования 802.11b и не создавать взаимных помех. Диапазон поддерживаемых им скоростей отражен в таблице 3.9, зависимость скорости от типа модуляции - на рис.5.57.

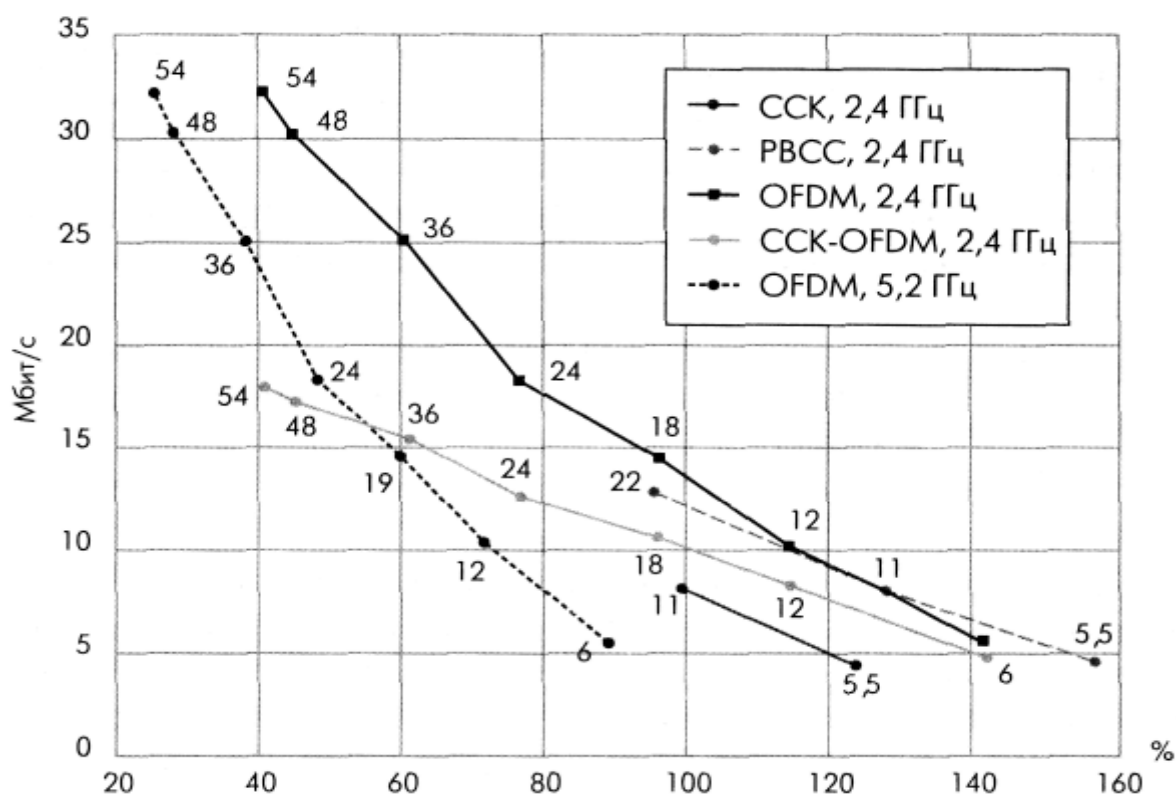


Рис. 5.57. Зависимость скорости передачи от расстояния для различных технологий передачи. Расстояние приведено в процентах, 100% - дальность передачи с модуляцией CCK на скорости 11 Мбит/с

Очевидно, что устройствам стандарта IEEE 802.11g достаточно долго придется работать в одних сетях с оборудованием 802.11b. Также очевидно, что производители в массе своей не будут поддерживать режимы CCK-OFDM и PBCC в силу их необязательности, ведь почти все решает цена устройства. Поэтому одна из основных проблем данного стандарта - как обеспечить бесконфликтную работу смешанных сетей 802.11b/g.

Основной принцип работы в сетях 802.11 - "слушать, прежде чем вещать". Но устройства 802.11b не способны услышать устройства 802.11g в OFDM-режиме. Ситуация аналогична проблеме скрытых станций: два устройства удалены настолько, что не слышат друг друга и пытаются обратиться к третьему, которое находится в зоне слышимости обоих. Для предотвращения конфликтов в подобной ситуации в 802.11 введен защитный механизм, предусматривающий перед началом информационного обмена передачу короткого кадра "запрос на передачу" (RTS) и получение кадра подтверждения "можно передавать" (CTS). Механизм RTS/CTS применим и к смешанным сетям 802.11b/g. Естественно, эти кадры



должны транслироваться в режиме ССК, который обязаны понимать все устройства. Однако защитный механизм существенно снижает пропускную способность сети.

Таблица 5.9. Стандарты физического уровня

Параметр	802.11 DSSS	802.11 FHSS	802.11b	802.11a	802.11g
Частотный диапазон (ГГц)	2,4	2,4	2,4	5	2,4
Максимальная скорость передачи данных (Мбит/с)	2	2	11	54	54
Технология	DSSS	FHSS	ССК	OFDM	OFDM
Тип модуляции (для максимальной скорости передачи)	QPSK	GFSK	QPSK	64-QAM	64-QAM
Число неперекрывающихся каналов	3	3	3	15	3

## Создание модели радиointерфейса WiFi 802.11 [21]

### IEEE 802.11b

Чтобы открыть модель необходимо в командном окне ввести (Command Window): commwlan80211b. Появится модель, изображенная на рис.3.58.

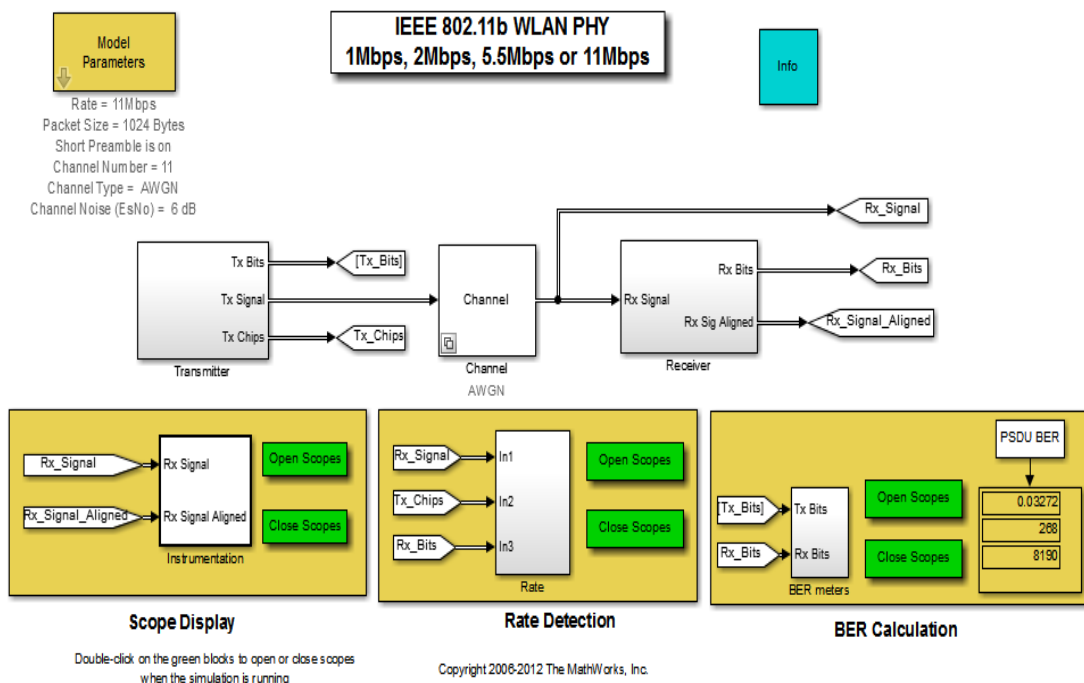


Рис. 5.58. Модель радиointерфейса 802.11b Simulink MATLAB 2015b

С помощью двойного щелчка на элемент Model Parameters можно устанавливать желаемые параметры моделируемой сети:

- скорость передачи данных (Rate),
- размер пакета (Packet Size),
- число каналов (Channel Number),
- тип канала (Channel Type),
- уровень шумов в канале (Channel EsNo).

Двойным щелчком по передатчику, приемнику или каналу передачи можно посмотреть их структурные схемы. Они представлены на рис.5.59, рис.5.60, рис.5.61.

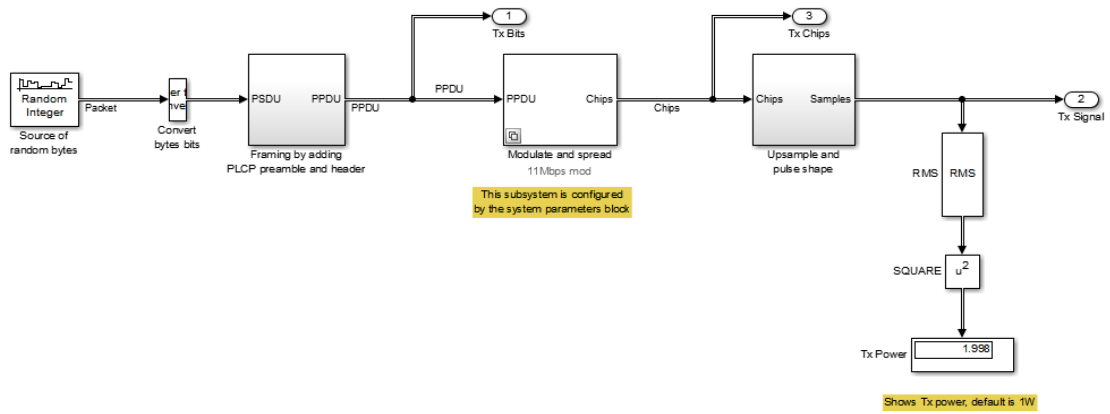


Рис. 5.59. Структурная схема передатчика IEEE 802.11b

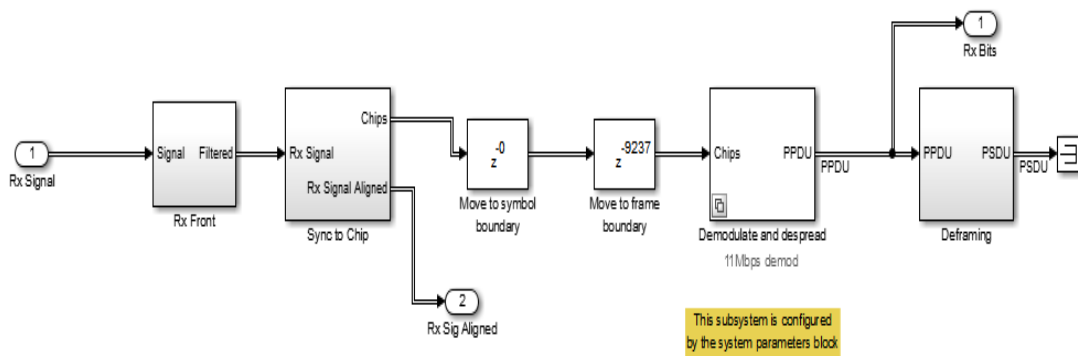


Рис. 5.60. Структурная схема приемника IEEE 802.11b

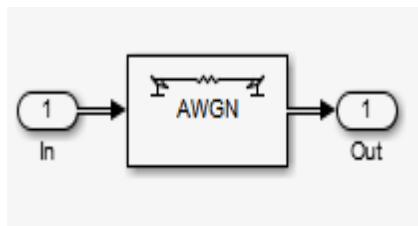


Рис. 5.61. Структурная схема канала передачи IEEE 802.11b

Пример частотной характеристика представлен на рис.5.62, а диаграмма созвездий на рис.5.63.

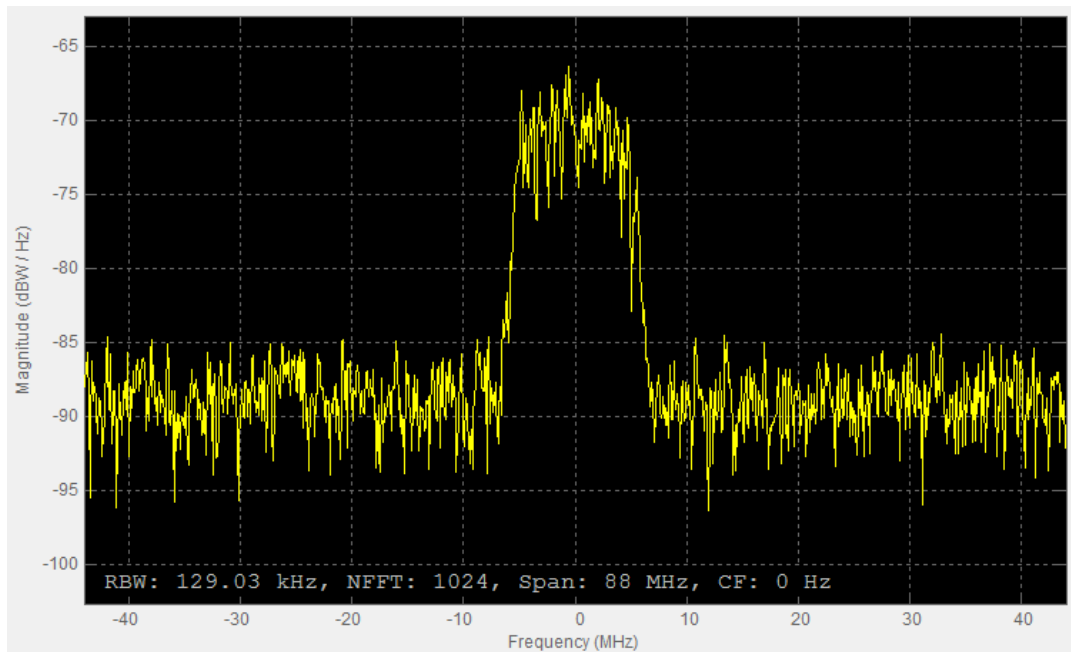


Рис. 5.62. Частотная характеристика для скорости передачи 11 Мбит/с

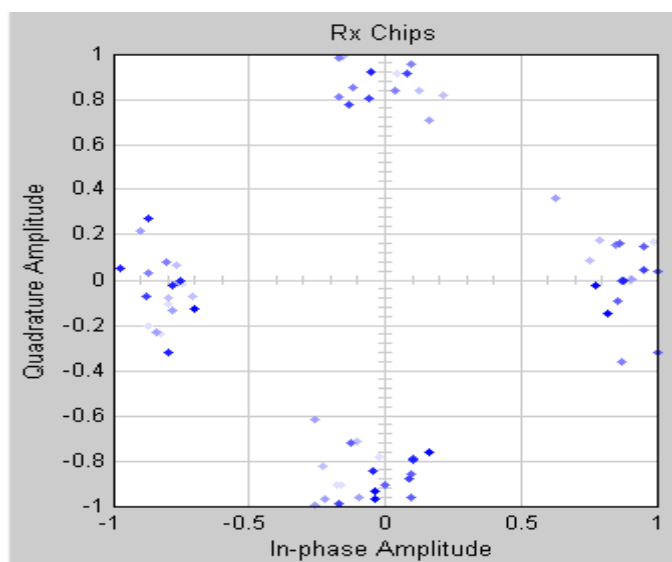


Рис. 5.63. Диаграмма созвездий для скорости передачи 11 Мбит/с

### Исследование влияния ошибок BER

BitErrorRate (BER) - коэффициент ошибок, отношение числа неверно принятых битов (0 вместо 1 и наоборот) к полному числу переданных битов при передаче по каналу связи.

Чтобы получить зависимость BER от отношения сигнал/шум необходимо изменять уровень шумов в канале (0-14) и снимать показания в блоке BER Calculation в верхнем дисплее.

Протестировав систему таким образом, были получены зависимости, представленные на рис.3.64.

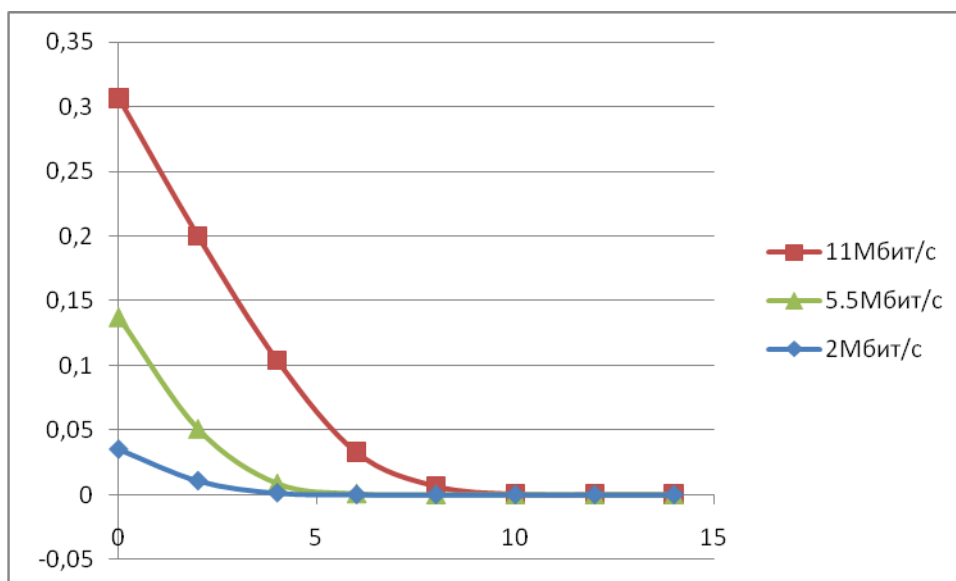


Рис. 5.64. Зависимость ошибки BER от отношения сигнал/шум для различных скоростей IEEE 802.11b

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- 1) Большим скоростям соответствует большая вероятность появления ошибки
- 2) Для уменьшения ошибки необходимо увеличивать отношение сигнал/шум
- 3) Большим скоростям необходимо более высокое значение отношения сигнал шум для устранения возможных ошибок.

В результате работы изучены стандарты IEEE 802.11.

Рассмотрены и протестированы модели данных стандартов, реализованные в среде Simulink Matlab. Получены графики зависимостей вероятности ошибки (BER) от отношения сигнал/шум для разных скоростей.

## Методические указания к моделированию [25]

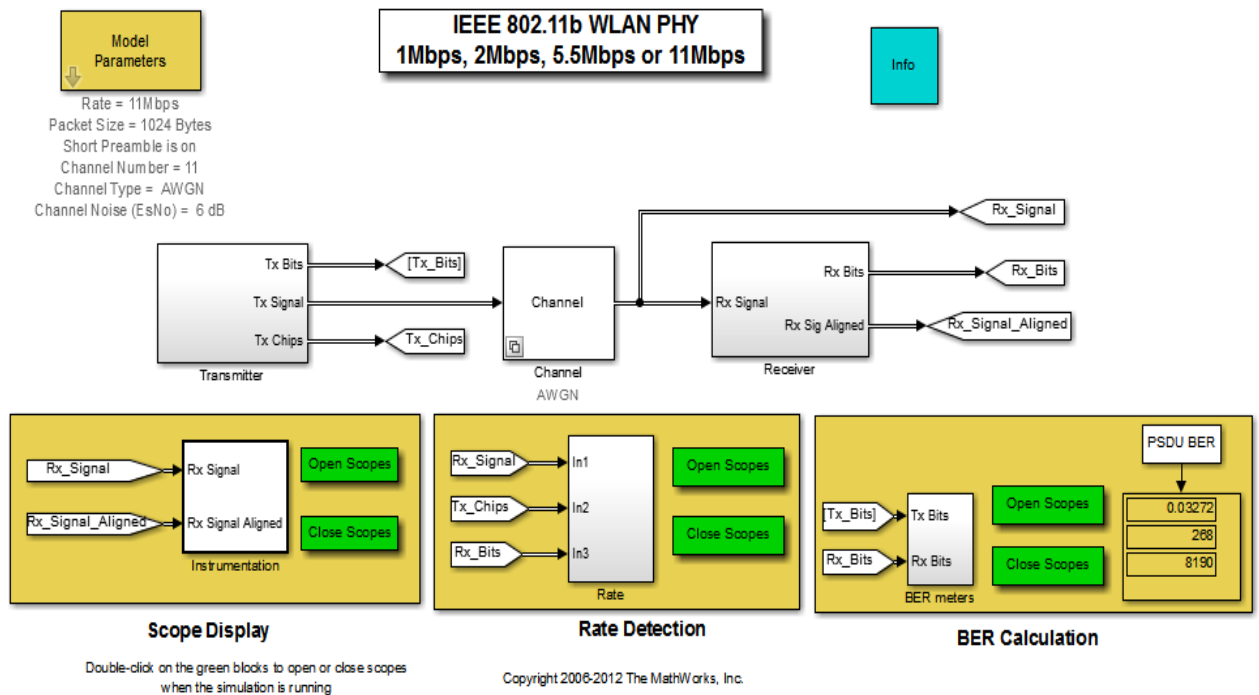


Рис. 5.65. Схем сети IEEE 802.11b MATLAB

1. Запустить модель командой `commwlan80211b` и изучить ее параметры. Сделать скриншоты полной схемы, а также передатчика, приёмника и канала.

2. Снять частотную характеристику, а также диаграмму созвездий для 4-х вариантов максимальной скорости передачи (1, 2, 5, 11 Мбит/с). Параметр «тип канала» (Channel Type) – none.

3. Для каждой скорости изменяя отношение сигнал/шум в канале от 0 до 14дБ снять зависимость BER от Channel EsNo. Параметр «тип канала» (Channel Type) – AWGN.

5. Сделать выводы по проделанной работе.

### 5.4. Имитационное моделирование системы мобильной связи стандарта IEEE 802.15.4 ZigBee [25]

Среди наиболее известных беспроводных технологий можно выделить: Wi-Fi, Wi-Max, Bluetooth, Wireless USB и относительно новую технологию — ZigBee, которая изначально разрабатывалась с ориентацией на промышленные применения.

Каждая из этих технологий имеет свои уникальные характеристики, которые определяют соответствующие области применения.

Стандарт	802.15.4 ZigBee™		802.15.1 Bluetooth	802.15.3 High Rate WPAN, WiMedia	802.15.3a* UWB	802.11b Wi-Fi	
Приложения	Мониторинг, управление, сети датчиков, домашняя/промышленная автоматика		Голос, данные, замена кабелей	Потоковое мультимедиа, замена кабелей аудио/видеосистем		Данные, видео, ЛВС	
Преимущества	Цена, энергосбережение, размеры сети, менее загруженные диапазоны	Цена, энергосбережение, размеры сети, глобальный диапазон	Цена, энергосбережение, передача голоса, перескоки частоты	Высокая скорость, энергосбережение		Скорость, гибкость	
Частота, ГГц	0,868	0,915	2,4		3,1 – 10,6	2,4	
Макс. скорость	20 Кбит/с	40 Кбит/с	250 Кбит/с	1 Мбит/с	22 Мбит/с (доп. 11, 33, 44, 55 Мбит/с)	110 Мбит/с (10 м), 200 Мбит/с (4 м) (доп. 480 Мбит/с)	11 Мбит/с
Выходная мощность (ном.), дБм	0		0 (класс 3) 4 (класс 2) 20 (класс 1)	0	< 20 (110 Мбит/с) < 24 (200 Мбит/с)	20	
Дальность, м	10 – 100		10 (класс 3) 100 (класс 1)	5 – 50	10 (110 Мбит/с) 4 (200 Мбит/с)	100	
Чувствительность (спецификация, дБм)	-92	-85	-70	-75	-	-76	
Размер стека, Кбайт	4 – 32		> 250	-		> 1000	
Срок службы батареи, дней	100 – 1000+		1 – 7	теоретически более 1000		0,5 – 5	
Размер сети	65536 (16-битные адреса), 2 <sup>64</sup> (64-битные адреса)		мастер +7	до 127 на хост		32	

Рис. 5.66. Основные характеристики популярных стандартов беспроводной связи

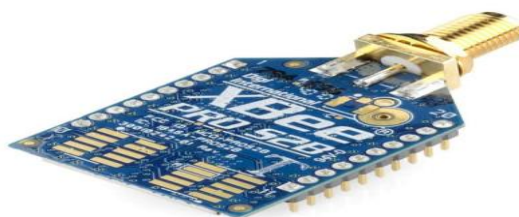


Рис. 5.67. Внешний вид микросхемы ZigBee

Анализ беспроводных технологий показывает, что высокоскоростные технологии Wi-Fi, Wi-Max, Bluetooth, Wireless USB предназначены в первую очередь для обслуживания компьютерной периферии и устройств мультимедиа. Они оптимизированы для передачи больших объемов информации на высоких скоростях, работают в основном по топологии «точка-точка» или «звезда» и малопригодны для реализации сложных разветвленных промышленных сетей с большим количеством узлов. Напротив, технология ZigBee имеет достаточно скромные показатели скорости

передачи данных и расстояния между узлами, но обладает следующими важными, с точки зрения применения в промышленности, преимуществами:

- Она ориентирована на преимущественное использование в системах распределенного мульти-микропроцессорного управления со сбором информации с интеллектуальных датчиков, где вопросы минимизации энергопотребления и процессорных ресурсов являются определяющими.

- Предоставляет возможность организации самоконфигурируемых сетей со сложной топологией, в которых маршрут сообщения автоматически определяется не только числом исправных или включенных/выключенных на текущий момент устройств (узлов), но и качеством связи между ними, которое автоматически определяется на аппаратном уровне.

- Обеспечивает масштабируемость — автоматический ввод в работу узла или группы узлов сразу после подачи питания на узел.

- Гарантирует высокую надежность сети за счет выбора альтернативного маршрута передачи сообщений при отключениях/сбоях в отдельных узлах.

- Поддерживает встроенные аппаратные механизмы шифрации сообщений AES-128, исключая возможность несанкционированного доступа в сеть.

### **Организация сети ZigBee**

ZigBee — относительно новый стандарт беспроводной связи, который изначально разрабатывался как средство для передачи небольших объемов информации на малые расстояния с минимальным энергопотреблением. Фактически этот стандарт описывает правила работы программно-аппаратного комплекса, реализующего беспроводное взаимодействие устройств друг с другом.

Стек протоколов ZigBee представляет собой иерархическую модель, построенную по принципу семиуровневой модели протоколов передачи данных в открытых системах OSI (OpenSystemInterconnection). Стек включает в себя уровни стандарта IEEE 802.15.4, отвечающие за реализацию канала связи, и программные сетевые уровни и уровни поддержки приложений, определенные спецификацией ZigBee. Модель реализации стандарта связи ZigBee представлена на рисунке 3.69.





Рис. 5.68. Многоуровневая модель стандарта связи ZigBee

Стандарт IEEE 802.15.4 определяет два нижних уровня стека: уровень доступа к среде (MAC) и физический уровень передачи данных в среде распространения (PHY), то есть нижние уровни протокола беспроводной передачи данных. Альянс определяет программные уровни стека ZigBee от уровня канала передачи данных (DataLinkControl) до уровня профилей устройств (ZigBeeProfiles). Прием и передача данных по радиоканалу осуществляется на физическом уровне PHY, определяющем рабочий частотный диапазон, тип модуляции, максимальную скорость, число каналов. Уровень PHY осуществляет активацию-деактивацию приемопередатчика, детектирование энергии принимаемого сигнала на рабочем канале, выбор физического частотного канала, индикацию качества связи при получении пакета данных и оценку свободного канала. Важно понимать, что стандарт 802.15.4 — это физическое радио (микросхема радио-приемопередатчика), а ZigBee — это логическая сеть и программный стек, обеспечивающие функции безопасности и маршрутизации.

Далее в структуре стека ZigBee следует уровень контроля доступа к среде IEEE 802.15.4 MAC, осуществляющий вход и выход из сети устройств, организацию сети, формирование пакетов данных, реализацию различных режимов безопасности (включая 128-битное шифрование AES), 16- и 64-битную адресацию.

Уровень MAC обеспечивает различные механизмы доступа в сеть, поддержку сетевых топологий от «точка-точка» до «многочейковая сеть», гарантированный обмен данными (ACK, CRC), поддерживает потоковую и пакетную передачи данных.

Для предотвращения нежелательных взаимодействий возможно использование временного разделения на основе протокола CSMA-CA (протокол множественного доступа к среде с контролем несущей и предотвращением коллизий).

Временное разделение ZigBee базируется на использовании режима синхронизации, при котором подчиненные сетевые устройства, большую часть времени находящиеся в «спящем» состоянии, периодически «просыпаются» для приема сигнала синхронизации от сетевого координатора, что позволяет устройствам внутри локальной сетевой ячейки знать, в какой момент времени осуществлять передачу данных. Данный механизм, основанный на определении состояния канала связи перед началом передачи, позволяет существенно сократить (но не устранить) столкновения, вызванные передачей данных одновременно несколькими устройствами. Стандарт 802.15.4 основывается на полудуплексной передаче данных (устройство может либо передавать, либо принимать данные), что не позволяет использовать метод CSMA-CA для обнаружения коллизий — только для их предотвращения.

В спецификации стека предусмотрены три типа устройств: координатор, маршрутизатор и конечное устройство.

**Координатор** инициализирует сеть, управляет ее узлами, хранит информацию о настройках каждого узла, задает номер частотного канала и идентификатор сети PAN ID, а в процессе работы может являться источником, приемником и ретранслятором сообщений.

**Маршрутизатор** отвечает за выбор пути доставки сообщения, передаваемого по сети от одного узла к другому, и в процессе работы также может являться источником, приемником или ретранслятором сообщений. Если маршрутизаторы имеют соответствующие возможности, они могут определять оптимизированные маршруты к определенной точке и хранить их для последующего использования в таблицах маршрутизации.

**Оконечное устройство** не участвует в управлении сетью и ретрансляции сообщений, являясь только источником/приемником сообщений.

Среди свойств ZigBee следует особо выделить поддержку сложных топологий сетей. Именно за счет этого, при относительно малой максимальной дальности связи двух близлежащих устройств, возможно расширить зону покрытия сети в целом. Также этому способствует 16-битная адресация, позволяющая объединять в одну сеть более 65 тыс. устройств.

#### **Спецификация стандарта IEEE 802.15.4**

Спецификация ZigBee-стека определяет сетевой уровень, уровни безопасности и доступа к приложению и может использоваться совместно с решениями на базе стандарта 802.15.4 для обеспечения совместимости устройств.

Таблица 5.11. Спецификация стандарта IEEE 802.15.4

Стандарт	802.15.4 ZigBee™		
Частота	868 МГц	915 МГц	2,4 ГГц
Число каналов/шаг	1/–	10/2 МГц	16/5 МГц
География распространения	Европа	Америка	Весь мир
Макс. скорость, модуляция	20 кбит/с, BPSK	40 кбит/с, BPSK	250 кбит/с, O- QPSK
Выходная мощность, ном.	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)
Дальность	10–100м		
Чувствительность (спецификация)	–92dBm	–92dBm	–85dBm
Размер стека	4–32 кбайт		
Срок службы батареи	От 100 до 1000 и более дней		
Размер сети	65536 (16-битные адреса), $2^{64}$ (64-битные адреса)		

### Практическая часть

Задание:

1. Собрать схему
2. Подготовить схемы для реализации Стандарта ZigBee 802.15.4 основываясь на примере, представленном в отчете.
3. Изменять SNR в пределах от 1 до 100 (не менее 4-х точек)
4. Построить графики зависимости SNR от BER
5. Все поэтапное исследование представить в отчете.

В рабочем поле необходимо собрать схему для работы стандарта ZigBee 802.15.4. Схема представлена на рисунке 5.70.

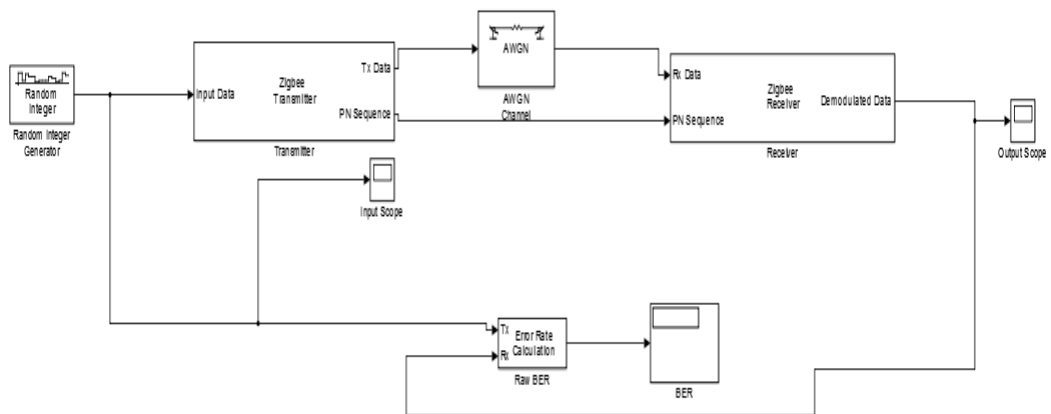


Рис. 5.69. Схема стандарта ZigBee 802.15.4 Simulink MATLAB 2015b

В состав схемы входят:

1. RandomIntegerGenerator
2. ZigBeeTransmitter
3. AWGN Channel (каналпередачи)
4. ZigBeeReciever
5. ErrorRateCalculation (анализаторошибок)
6. Display

Рассмотрим каждый блок отдельно. Все значения, заданные в блоках, помимо отношения Сигнал/шум в канале, остаются неизменными.

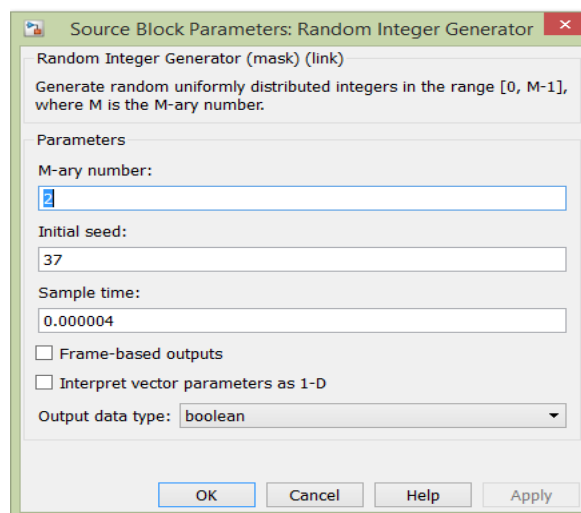


Рис. 5.70. Параметры блока Random Integer Generator

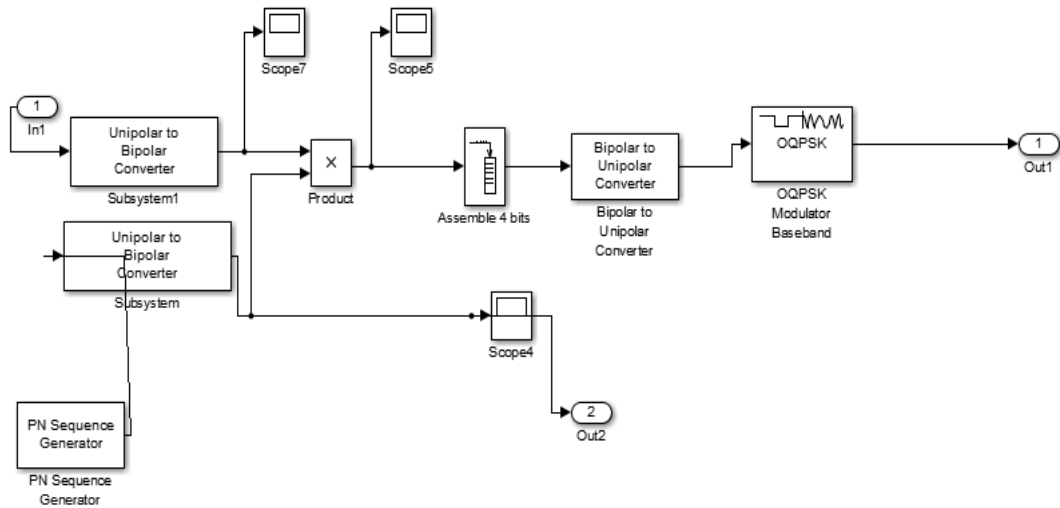


Рис. 5.71. Схема ZigBeeTransmitter

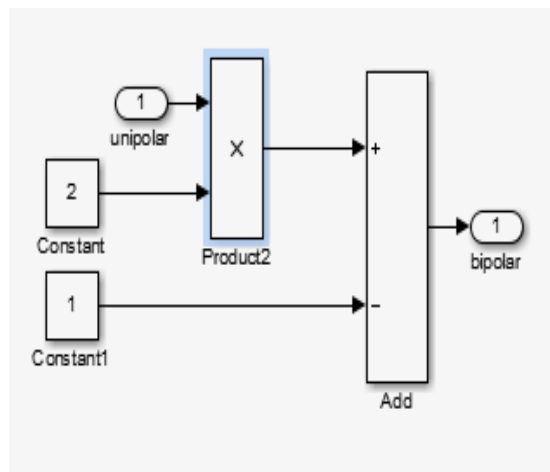


Рис. 5.72. Unipolar to bipolar converter

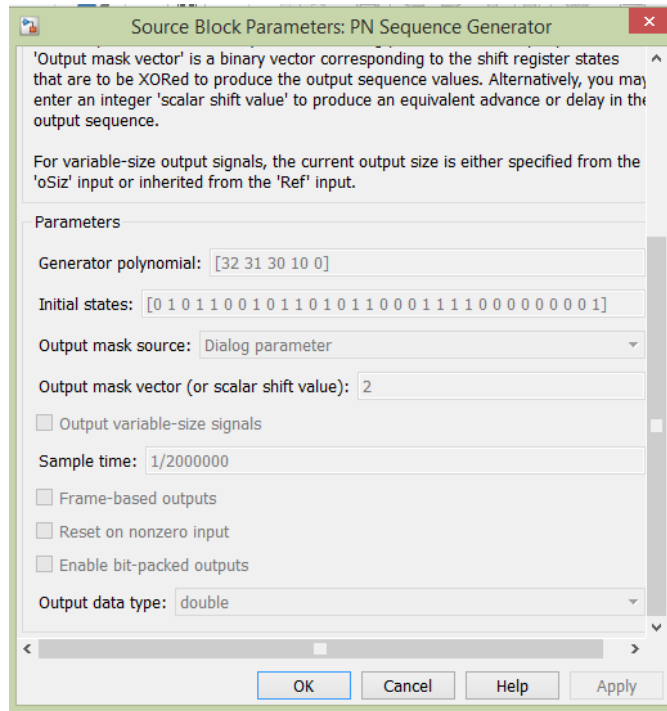


Рис. 5.73. Параметры блока PN sequence generator

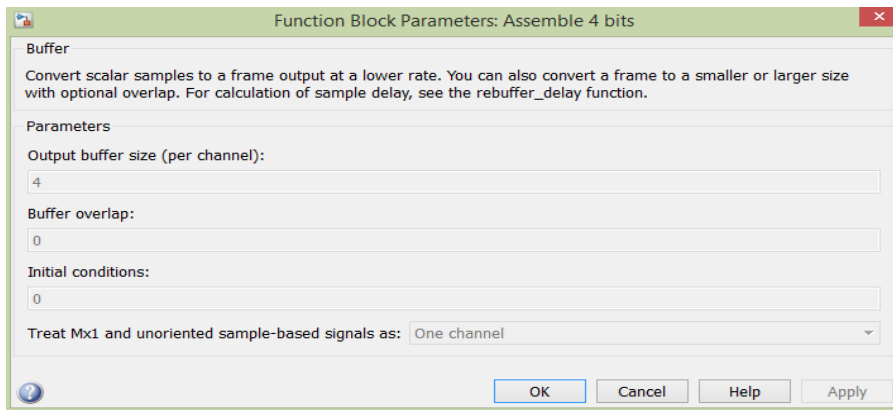


Рис. 5.74. Параметры блока Function block parameters: Assemble 4 bits

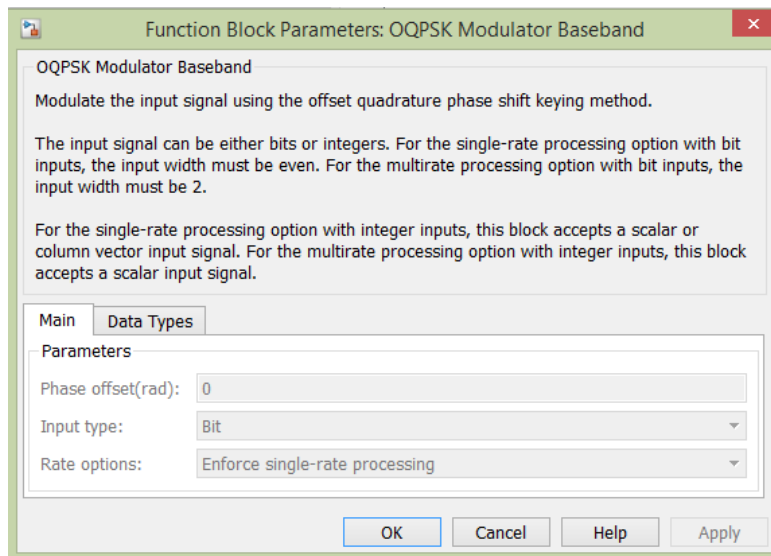


Рис. 5.75. Параметры блока OQPSK modulator baseband

OQPSK - четырехпозиционная фазовая модуляция со сдвигом квадратур (OQPSK), где битовые потоки, подаваемые на модуляторы квадратур I и Q, сдвинуты

друг относительно друга на длительность одного бита (половина символьного интервала).

Рассмотрим блок канала с БГШ. В данном блоке необходимо изменять значения в строчке  $E_b/N_0$  от 1 до 100.

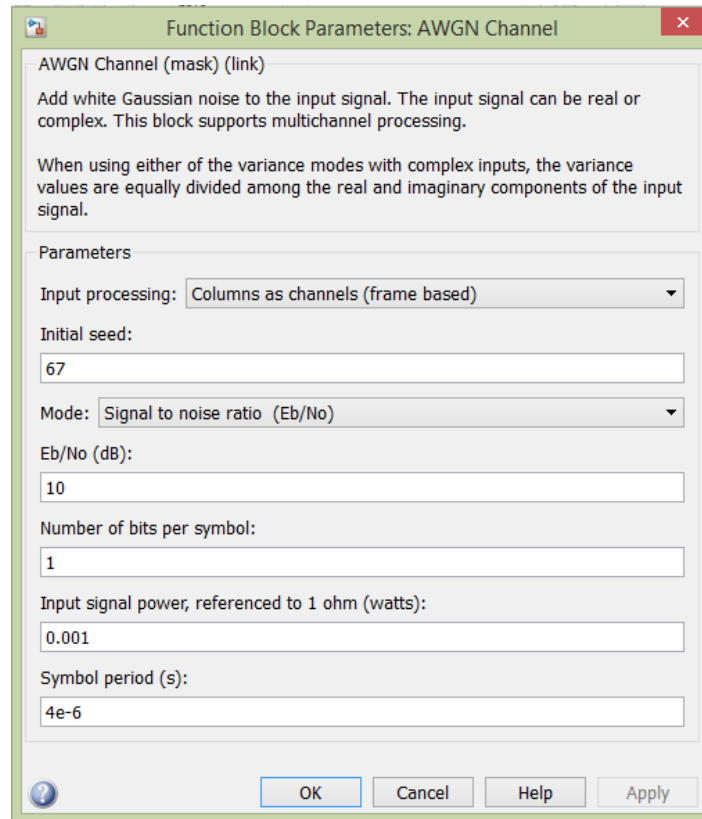


Рис. 5.76. Параметры блока AWGNchannel

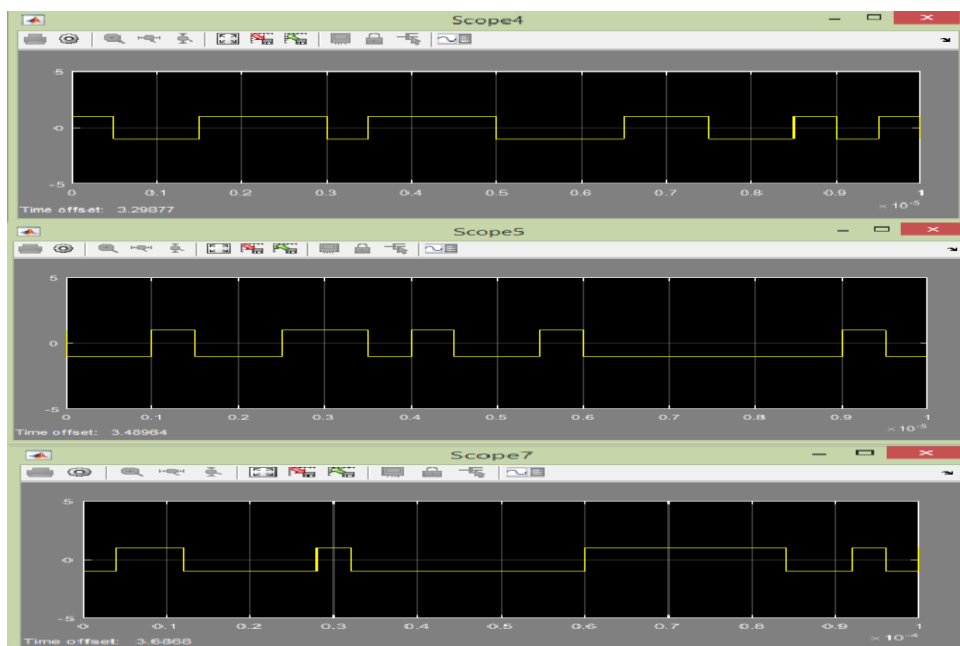


Рис. 5.77. Вид сигнала на осциллографах 4, 5, 7

Рассмотрим подробнее блок ZigBee Receiver.

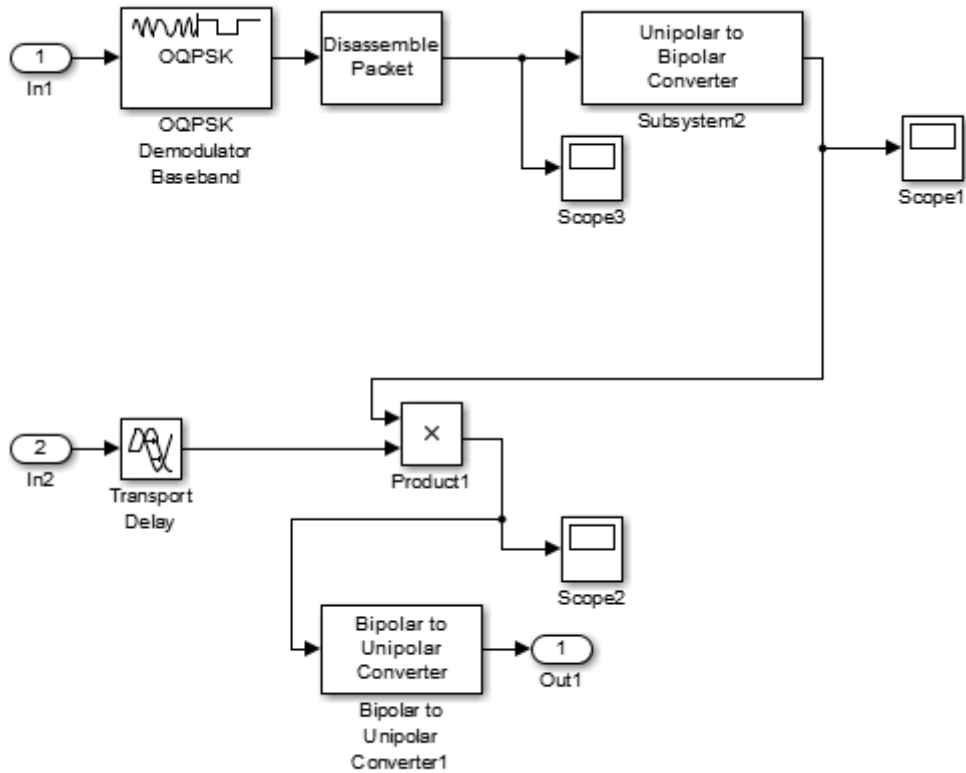


Рис. 5.78. Схема приемника стандарта ZigBee

Рассмотрим каждый блок отдельно. Единственным незнакомым элементом является блок TransportDelay.

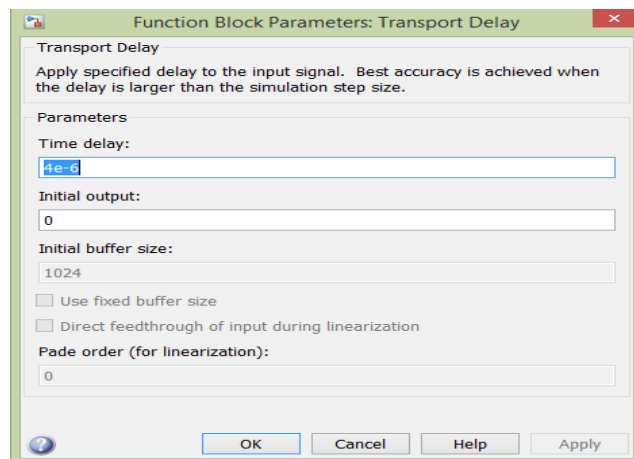


Рис. 5.79. Параметры блока TransportDelay



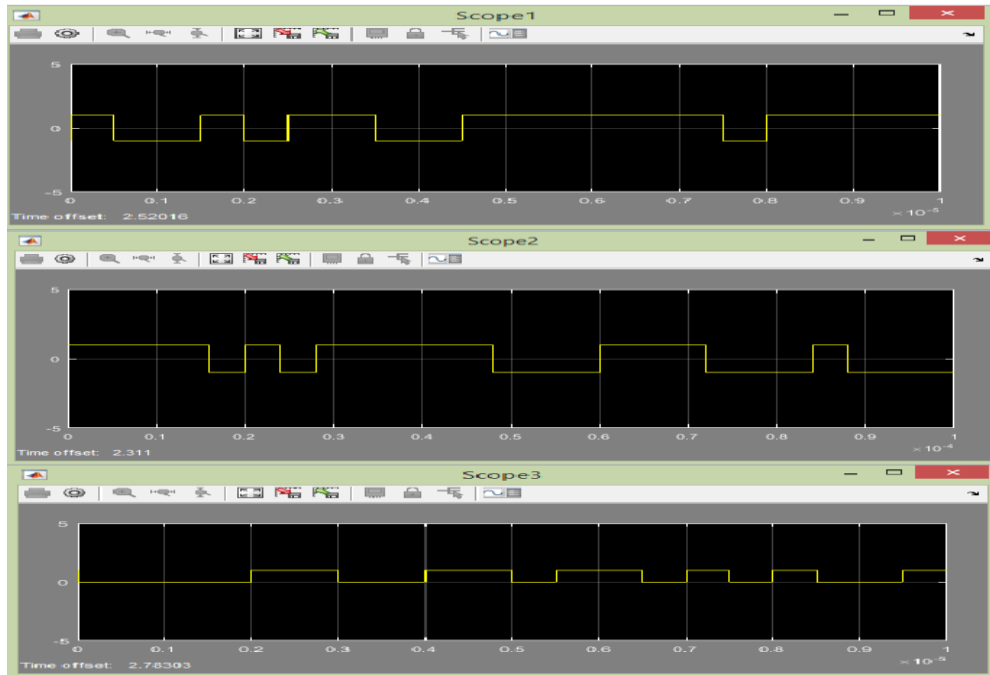


Рис. 5.80. Вид сигнала на осциллографах 1, 2, 3

Вернемся к общей схеме стандарта ZigBee.

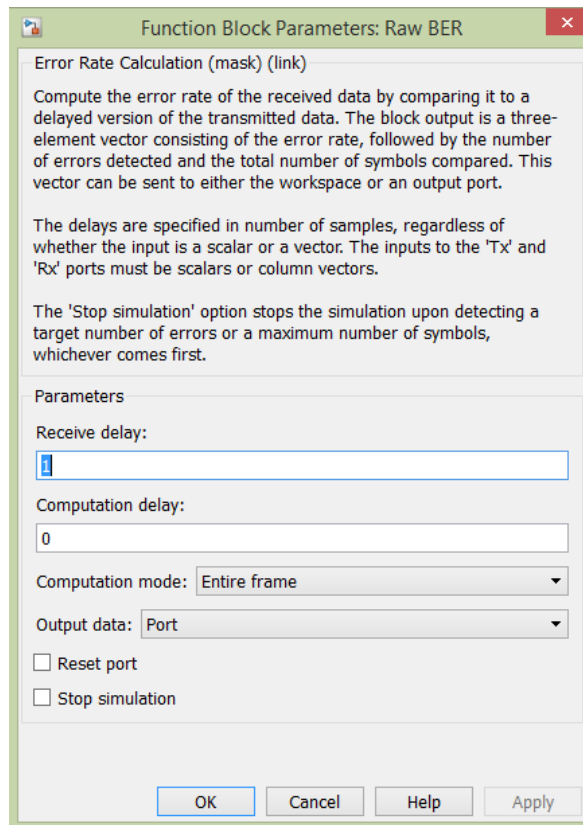


Рис. 5.81. Параметры блока RawBER

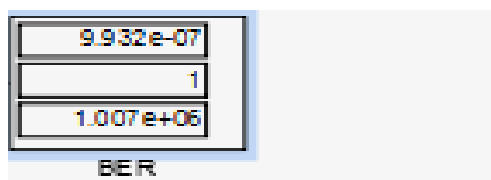


Рис. 5.82. Счетчик ошибок

Для построения графика зависимости BER от SNR, необходимо из счетчика брать первую строку.

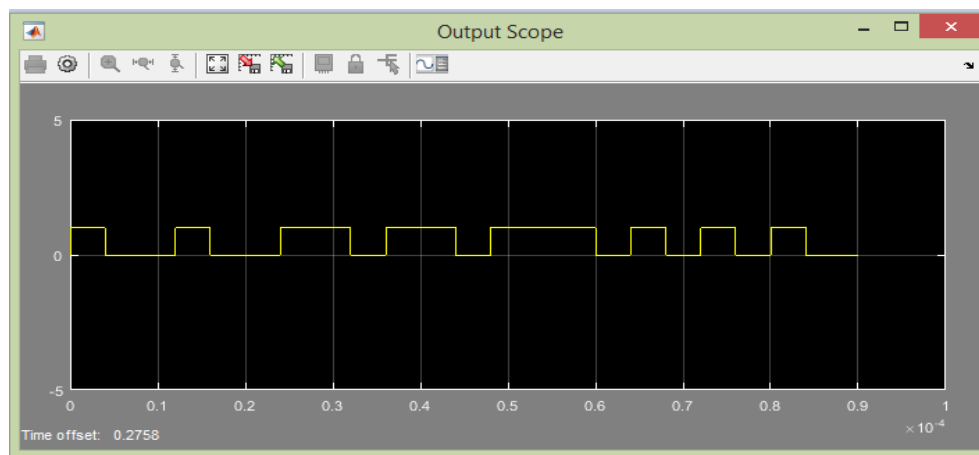


Рис. 5.83. Вид сигнала на выходе

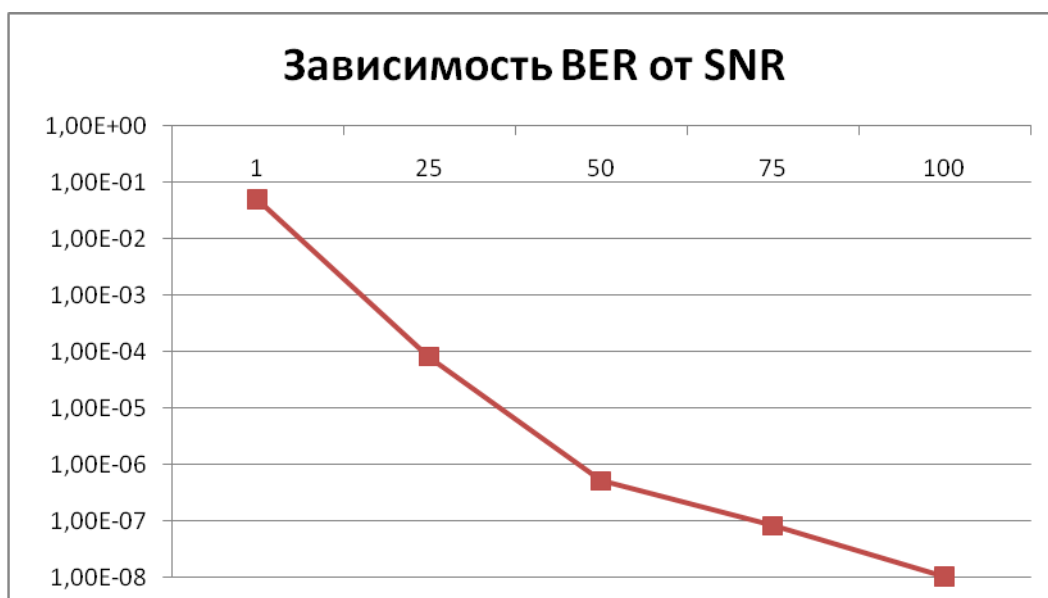


Рис. 5.84. График зависимости BER от SNR

В разделе построена схема стандарта ZigBee 802.15.4 в среде Simulink. Построен график зависимостей зависимости BER от SNR. Из графика (рисунок 5.85) видно, что при увеличении значения сигнал/шум, снижается количество ошибок.

## 5.5. Проектирование защищенной системы мобильной связи стандарта IEEE 802.15.1 (Bluetooth) [17-25]

### Bluetooth

Стандарт Bluetooth является компромиссным с точки зрения соотношения параметров экономичность/дальность/скорость. По своей функциональности и возможности применения в различных приложениях он имеет наибольшее число

пересечений с другими стандартами группы Short Range RF. Поэтому для начала рассмотрим именно его.

Основная идея Bluetooth заключалась в создании универсального, надежного и очень дешевого радиоинтерфейса беспроводного доступа. Технология Bluetooth позволяет обеспечить сопряжение с различным профессиональным и бытовым оборудованием в режимах передачи речи, данных и мультимедиа, при этом гарантируется его электромагнитная совместимость с другим домашним или офисным оборудованием. Как было указано в таблице, существует всего три класса устройств Bluetooth, если градировать их по излучаемой мощности: 1-й — до 100 метров (до 100 мВт); 2-й — до 10 метров (до 2,5 мВт); 3-й — до 1 метра (до 1 мВт).

Для определения модели поведения при установлении соединения между различными типами устройств в технологии Bluetooth введено понятие профиль. Этим термином обозначается набор функций и возможностей, которые использует Bluetooth в качестве механизма транспортировки. Профили гарантируют возможность обмена информацией между устройствами разных производителей. Bluetooth SIG определяет 15 стандартных профилей:

- Generic Access Profile (GAP);
- Service Discover Application Profile (SDAP);
- Serial Port Profile (SPP);
- Dial-up Networking Profile (DUNP);
- Generic Object Exchange Profile (GOEP);
- Object Push Profile (OPP);
- File Transfer Profile (FTP);
- Synchronization Profile (SP);
- AV Control, Headset Profile (HSP);
- Advanced Audio Distribution Profile (A2DP);
- Basic Imaging Profile (BIP);
- Handsfree Profile (HFP);
- Human Interface Device Profile (HID);
- LAN Access Profile (LAP);
- Sim-Card Access Profile (SAP).

По характеру взаимодействия со внешними устройствами и приложениями архитектура всех существующих модулей Bluetooth может быть разделена на три вида (рис. 1). Модули с двухпроцессорной архитектурой (рис. 1а) не содержат в себе программного высокоуровневого стека Bluetooth с поддержкой стандартных профилей. Это значит, что необходимые профили Bluetooth должны быть реализованы на

внешнем процессоре. Взаимодействие внешнего процессора с модулем происходит через виртуальный интерфейс HCI (Host Controller Interface). В частном случае HCI может быть реализован через аппаратный интерфейс SPI или UART.

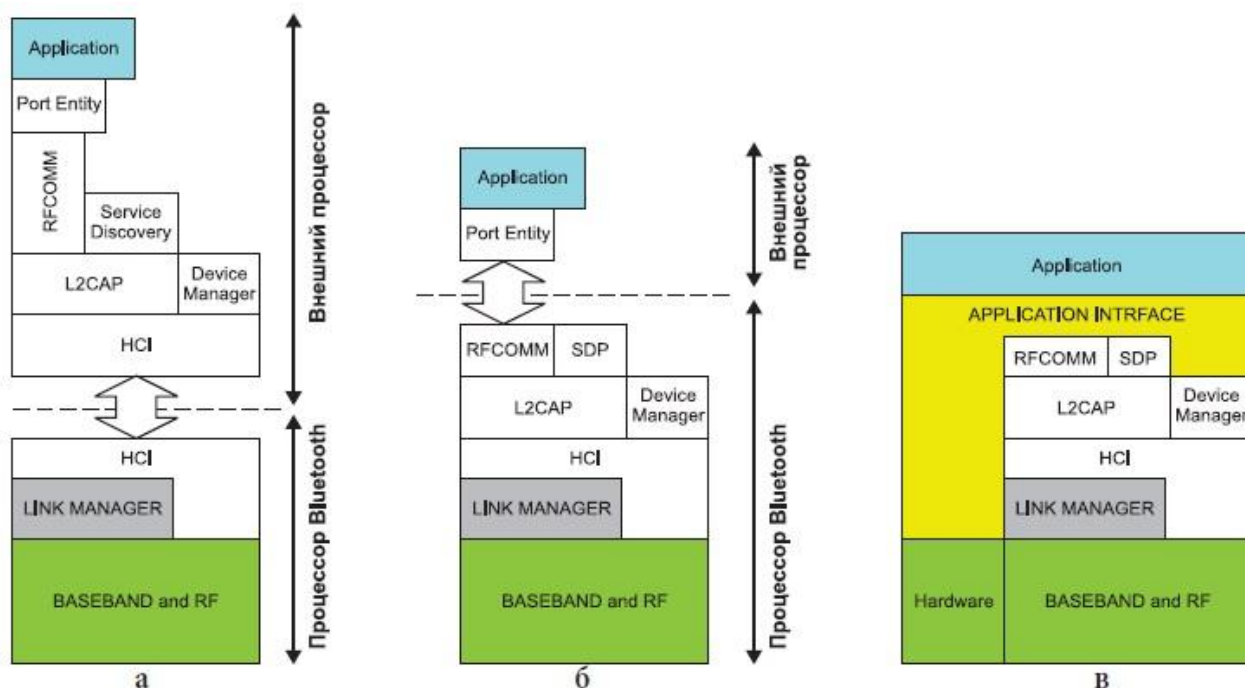


Рис. 5.85. Разновидности архитектуры модулей стандарта Bluetooth:

а) двухпроцессорная; б) встроенная двухпроцессорная; в) однопроцессорная

Модули Bluetooth со встроенной двухпроцессорной архитектурой (рис. 3.85б) являются наиболее распространенными. Данная разновидность архитектуры подразумевает наличие стека Bluetooth высокого уровня с поддержкой стандартных профилей непосредственно во внутреннем процессоре модуля. В этом случае приложение, работающее на внешнем процессоре, взаимодействует с модулем Bluetooth через аппаратные интерфейсы.

Однопроцессорная архитектура (рис. 3.85в) является наименее распространенной. Для ее реализации разработчик должен создать специальное приложение, которое будет работать на внутреннем процессоре модуля Bluetooth. В этом случае модуль превращается в автономное устройство, доступ к которому через внешние аппаратные интерфейсы закрыт.

Принадлежность модуля к той или иной архитектуре может определяться как его аппаратной реализацией, так и внутренним программным обеспечением. Например, в частном случае один и тот же модуль Bluetooth может быть отнесен к любой из трех разновидностей архитектуры в зависимости от типа прошивки, загруженной во внутренний процессор модуля. Такой подход пользуется наибольшей популярностью среди зарубежных производителей.

Чтобы получить наиболее полное представление о роли Bluetooth среди других представителей группы Short Range RF, обратимся к истории (рис. 5.86). Развитие Bluetooth с самого начала шло по пути увеличения скорости обмена данными, снижения энергопотребления, повышения безопасности и надежности соединения. Вплоть до версии 3.0 сохранялась обратная совместимость всех версий Bluetooth между собой. До сих пор в эксплуатации встречаются устройства Bluetooth версий 1.1 и 1.2, которые успешно используются совместно с 2.0 и 2.1.

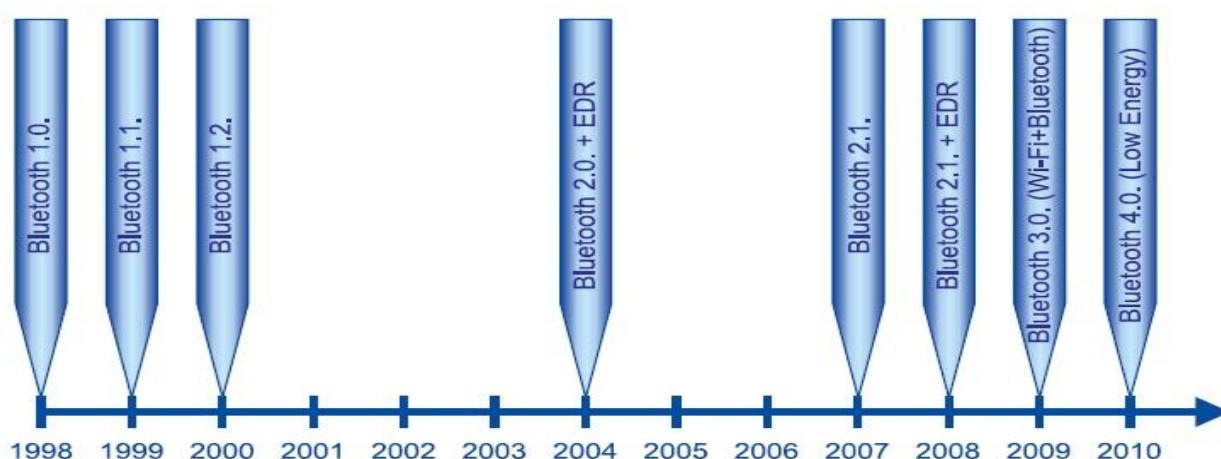


Рис. 5.86. Хронология развития стандарта Bluetooth

Bluetooth 3.0 является чем-то средним между Bluetooth и Wi-Fi. Модули с ее поддержкой соединяют в себе две радиосистемы: первая обеспечивает передачу данных в 3 Мбит/с (стандартная для Bluetooth 2.0) и имеет низкое энергопотребление; вторая совместима со стандартом 802.11 (Wi-Fi) и обеспечивает возможность передачи данных со скоростью до 24 Мбит/с (сравнима со скоростью сетей Wi-Fi). Выбор радиосистемы для передачи данных зависит от размера передаваемого файла. Это один из наиболее ярких примеров объединения двух разных технологий для завоевания новых сегментов рынка. Правда, успеха эта попытка не имела: распространения Bluetooth 3.0 не получил.

Bluetooth 4.0 не имеет обратной совместимости с предыдущими версиями. Сверхнизкое энергопотребление достигается за счет использования специального алгоритма работы. Передатчик включается только на время отправки данных, что обеспечивает возможность работы от одной батарейки типа CR2032 в течение нескольких лет. Стандарт предоставляет скорость передачи данных в 1 Мбит/с при размере пакета 8–27 байт. В новой версии два Bluetooth-устройства смогут устанавливать соединение менее чем за 5 мс и поддерживать его на расстоянии до 100 м. Для этого используется усовершенствованная коррекция ошибок, а необходимый уровень безопасности обеспечивает 128-битное шифрование.

Предполагается, что Bluetooth 4.0 будет конкурировать и вытеснять ZigBee в классе малопотребляющих радиочастотных устройств с поддержкой сложных сетей. Это также является ярким примером пересечения двух разных технологий, в данном случае — ZigBee и Bluetooth.

Проанализировав современное состояние технологии Bluetooth, можно обозначить плюсы и минусы. К достоинствам стандарта относятся:

- высокий уровень стандартизации и совместимость между устройствами Bluetooth разных производителей;
- защита передаваемых данных;
- низкая стоимость;
- высокая дальность действия (до 1000 м);
- универсальность и большое разнообразие модулей под разные задачи.

Среди недостатков отметим:

- Относительно высокое энергопотребление (работа от автономных источников питания не всегда возможна). Предполагается, что этого недостатка будет лишена новая версия спецификации Bluetooth 4.0.
- Относительно невысокая скорость обмена данными (до 1 Мбит/с). Как правило, реальная скорость обмена данными ограничивается пропускной способностью внешних аппаратных интерфейсов модуля.

Одно из основных преимуществ стандарта Bluetooth заключается в его высоком уровне стандартизации и широчайшем распространении в составе пользовательских электронных устройств. Это позволяет в ряде случаев практически в два раза сэкономить время и затраты на разработку при проектировании некоторой системы сбора данных, телеметрии или управления на основе Bluetooth, поскольку в качестве одной из сторон беспроводного обмена данными может выступать, например, обычный серийно выпускаемый ноутбук или коммуникатор с поддержкой данной технологии.

Исходя из характерных особенностей модулей Bluetooth, сформировались их области применения в России и за рубежом:

- Автомобильная электроника. Модули Bluetooth могут использоваться в бортовых автомобильных системах контроля и управления. Эта область применения характерна для России.
- Системы удаленного управления и телеметрии. Здесь устройства Bluetooth могут использоваться наряду с модулями технологий Wi-Fi, ZigBee, Short Range RF 434/868 МГц. Данная область применения в равной степени актуальна как для России, так и для зарубежных стран.

## **Bluetooth**

Ноутбуки, сотовые телефоны, смартфоны, торговые терминалы со встроенной функцией Bluetooth. Bluetooth - это современная технология беспроводной передачи данных, позволяющая соединять друг с другом практически любые устройства: мобильные телефоны, ноутбуки, принтеры, цифровые фотоаппараты и даже холодильники, микроволновые печи, кондиционеры. Соединить можно все, что соединяется (то есть имеет встроенный микрочип Bluetooth). Технология стандартизирована, следовательно, проблемы несовместимости устройств от конкурирующих фирм быть не должно.

Bluetooth - это маленький чип, представляющий собой высокочастотный (2.4 - 2.48 ГГц) приёмопередатчик, работающий в диапазоне ISM (Industry, Science and Medicine; промышленный, научный и медицинский). Для использования этих частот не требуется лицензия (исключения рассмотрим ниже). Скорость передачи данных, предусматриваемая стандартом, составляет порядка 720 Кбит/с в асимметричном режиме и 420 Кбит/с в полнодуплексном режиме. Обеспечивается передача трех голосовых каналов, но не видеосигнала. Энергопотребление (мощность передатчика) не должно превышать 10 мВт. Изначально технология предполагала возможность связи на расстоянии не более 10 метров. Сегодня некоторые фирмы предлагают микросхемы Bluetooth, способные поддерживать связь на расстоянии до 100 метров. Как радиотехнология, Bluetooth способна "обходить" препятствия, поэтому соединяемые устройства могут находиться вне зоны прямой видимости. Соединение происходит автоматически, как только Bluetooth-устройства оказываются в пределах досягаемости, причем не только по принципу точка - точка (два устройства), но и по принципу точка - много точек (одно устройство работает с несколькими другими). Естественно, для реализации технологии Bluetooth на практике необходимо определенное программное обеспечение (ПО). Кстати, в новую версию операционной системы MS Windows Whistler встроена поддержка Bluetooth [17].

### **Передача данных Bluetooth**

В стандарте Bluetooth предусмотрена дуплексная передача на основе разделения времени (Time Division Duplexing - TDD). Основное устройство передает пакеты в нечетные временные сегменты, а подчиненное устройство – в четные.

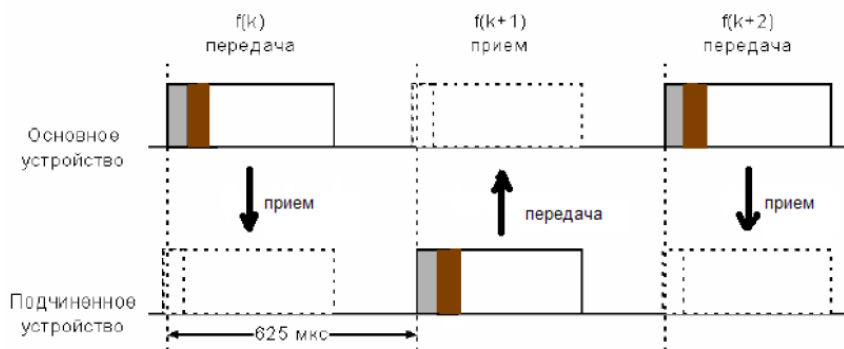


Рис. 5.87. Дуплексная передача с временным разделением

Пакеты в зависимости от длины могут занимать до пяти временных сегментов. При этом частота канала не меняется до окончания передачи пакета.

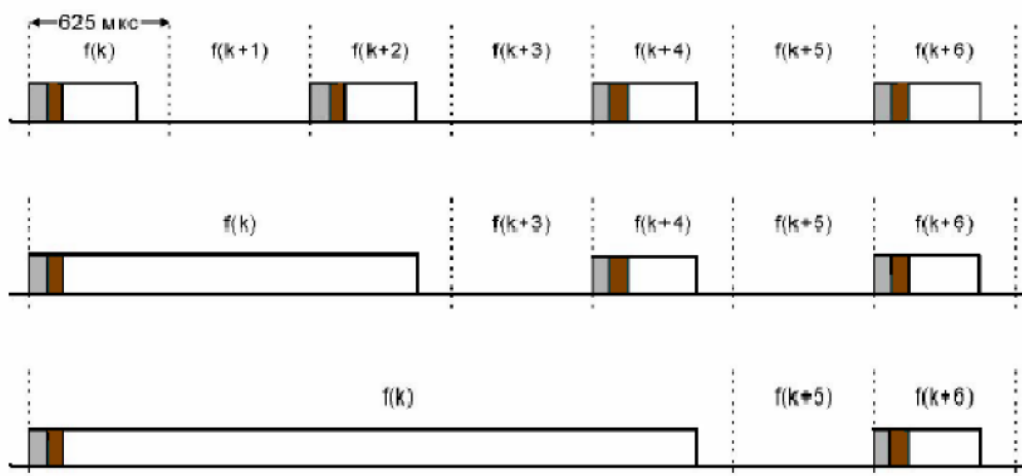


Рис. 5.88. Передача пакетов различной длины

Протокол Bluetooth может поддерживать асинхронный канал данных, до трех синхронных (с постоянной скоростью) голосовых каналов или канал с одновременной асинхронной передачей данных и синхронной передачей голоса. Скорость каждого голосового канала – 64 Кбит/с в каждом направлении, асинхронного в асимметричном режиме – до 723,2 Кбит/с в прямом и 57,6 кбит/с в обратном направлениях или до 433,9 Кбит/с в каждом направлении в симметричном режиме.

### Структура пакета

Стандартный пакет Bluetooth содержит код доступа длиной 72 бита, 54-битный заголовок и информационное поле длиной не более 2745 бит. Однако пакеты могут быть различных типов. Так, пакет может состоять только из кода доступа (в этом случае его длина равна 68 битам) или кода доступа и заголовка.



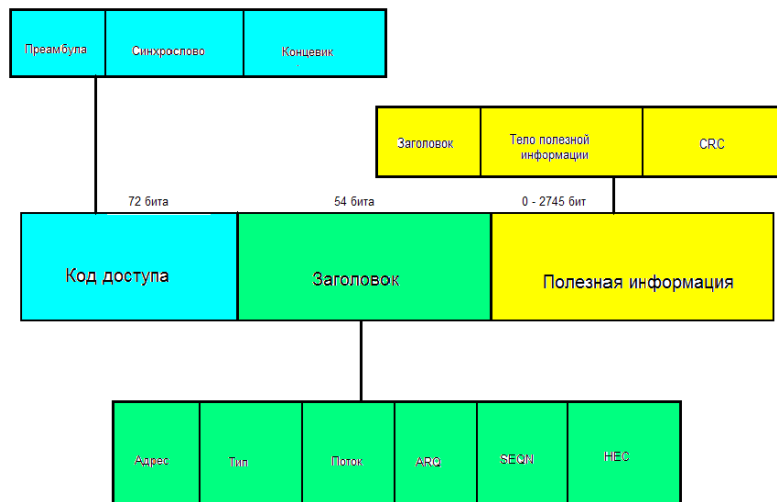


Рис. 5.89. Структура пакета

**Код доступа** идентифицирует пакеты, принадлежащие одной пикосети, а также используется для синхронизации и процедуры запросов. Он включает преамбулу (4 бита), синхрослово (64 бита) и концевик – 4 бита контрольной суммы.

**Заголовок** содержит информацию для управления связью и состоит из шести полей:

- Адрес (3 бита) - адрес активного элемента;
- Тип (4 бита) - код типа данных;
- Поток (1 бит) - управление потоком данных, показывает готовность устройства к приему;
- ARQ (1 бит) - подтверждение правильного приема;
- SEQN (1 бит) - служит для определения последовательности пакетов;
- HEC (8 бит) - контрольная сумма.

Заключительной частью общего формата пакета является **полезная информация**. В этой части есть два типа полей: поле голоса (синхронное) и поле данных (асинхронное). ACL пакеты имеют только поле данных, а SCO пакеты – только поле голоса. Исключением является пакет данных и голоса (Data Voice - DV), который имеет оба поля. Поле данных состоит из трех сегментов: заголовок полезной информации, тело полезной информации и возможно, CRC (Cyclic Redundancy Check) код.

- Заголовок полезной информации (8 бит). Только поля данных имеют заголовок полезной информации. Он определяет логический канал, управление потоком в логических каналах, а также имеет указатель длины полезной информации.

- Тело полезной информации (0-2721 бит). Тело полезной информации включает пользовательскую информацию. Длина этого сегмента указана в поле длины заголовка полезной информации.

- CRC (16 бит). От передаваемой информации вычисляется 16-битный циклический избыточный код (CRC), после чего он прикрепляется к информации.

Существует 4 типа контрольных пакетов: NULL, POLL, FHS, ID. Они одинаковые как для ACL, так и для SCO.

- ID-пакеты имеют длину 68 бит и применяются для пейджинга и запросов. Состоит из поля Код Доступа .

- NULL-пакеты (126 бит) состоят только из полей Код Доступа и Заголовков, играя роль подтверждений установления соединения или получения данных

- Тип POLL (126 бит) аналогичен предыдущему за исключением того, что POLL-пакеты обязывают получателя ответить.

- Пакеты FHS (366 бит) содержат информацию об адресе, классе устройства и тактовой частоте его передатчика

### Работа Bluetooth

Есть два основных состояния для устройств Bluetooth: Соединение (Connection) и Режим ожидания (Standby). Предусмотрено семь субсостояний, которые используются для добавления клиента или подключения к пикосети: **page, page scan, inquiry, inquiry scan, master response, slave response** и **inquiry response**.

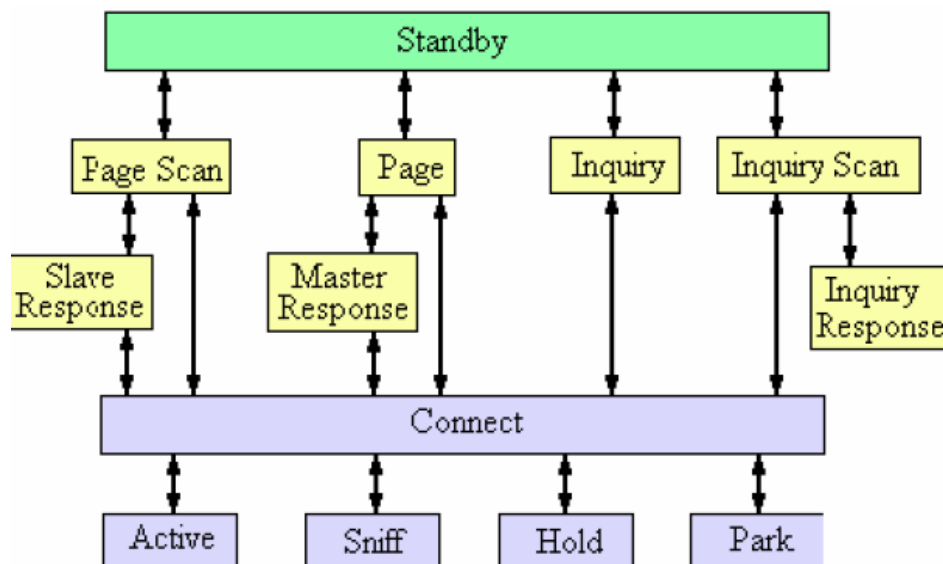


Рис. 5.60. Состояние соединений

Состояние Standby по умолчанию является режимом с пониженным энергопотреблением, работает только внутренний задающий генератор. В состоянии Соединения основной узел (master) и подчиненный (slave) могут обмениваться пакетами, используя код доступа к каналу.

Соединение между устройствами происходит так - если об удаленном устройстве ничего не известно, то используются процедуры inquiry и page. Если некоторая информация о устройстве все-таки есть, то достаточно процедуры page.

### Этап 1

Процедура **inquiry** позволяет устройству определить, какие приборы доступны, выяснить адреса и осуществить синхронизацию.

1.1 Посылаются пакеты inquiry и получаются отклики.

1.2 Если адресат, получивший пакет inquiry, находится в состоянии inquiry scan , тогда он способен принимать такие пакеты

1.3 Получатель переходит в состояние inquiry response и посылает отправителю пакет-отклик.

После того как процедура inquiry завершена, соединение может быть установлено с помощью процедуры paging.

## Этап 2

Процедура **paging** реализует соединение. Для осуществления этой процедуры необходим адрес. Устройство, выполняющее процедуру paging, автоматически становится хозяином этого соединения.

2.1 Посылается пакет paging

2.2 Адресат получит этот пакет (находится в состоянии page Scan)

2.3 Получатель посылает отправителю пакет-отклик (находится в состоянии Slave Response)

2.4 Инициатор посылает адресату пакет FHS (находится в состоянии Master Response).

2.5 Получатель посылает отправителю второй пакет-отклик (находится в состоянии Slave Response)

2.6 Получатель и отправитель устанавливают параметры канала заданные инициатором (находятся в состоянии Master Response & Slave Response)

После установления соединения основной узел (master) посылает пакет POLL, чтобы проверить, синхронизовал ли клиент свои часы и настроился ли на коммутацию частот. Клиент при этом может откликнуться любым пакетом. После успешного обнаружения устройств новое Bluetooth устройство получает набор адресов доступных Bluetooth устройств, после чего выясняет имена всех доступных Bluetooth устройств из списка. У каждого Bluetooth устройства есть свой глобально уникальный адрес, но на уровне пользователя обычно используется не этот адрес, а имя устройства, которое может быть любым, и ему не обязательно быть глобально уникальным. Имя Bluetooth устройства может быть длиной до 248 байт, и использовать кодовую страницу в соответствии с Unicode UTF-8 (при использовании UCS-2, имя может быть укорочено до 82 символов). Также у Bluetooth есть возможность автоматического подключения Bluetooth устройств к службам, предоставляемым другими Bluetooth устройствами. Поэтому, после того как имеется список имён и адресов, выполняется поиск доступных

услуг, предоставляемых различными устройствами. Для поиска возможных услуг используется специальный протокол обнаружения услуг (Service Discovery Protocol - SDP).

Устройство Bluetooth при установлении соединения может работать в четырех режимах: **Active** (активный), **Hold** (удержание), **Sniff** (прослушивание) и **Park** (пассивный).

### **"Частотный конфликт"**

Тот факт, что частотный диапазон 2.4 ГГц свободен от лицензирования, вносит определенные сложности в использование Bluetooth-устройств. В этом диапазоне работают также различные медицинские приборы, бытовая техника, беспроводные телефоны, беспроводные локальные сети стандарта IEEE. Вполне логично предположить, что они могут "конфликтовать" друг с другом. Во избежание интерференции с другими беспроводными устройствами Bluetooth работает по принципу скачкообразной перестройки частоты (1600 скачков в секунду). Переход с одной частоты на другую происходит по псевдослучайному алгоритму. Это позволяет "освободить" нужные другим устройствам частоты[3].

### **Моделирование Bluetooth**

Модель состоит из трех основных блоков:

- 1 Передатчик;
- 2 Канал;
- 3 Приемник.

Канал имеет три режима работы:

- 1 Нет канала;
- 2 AWGN канал;

Также имеется генератор сигнала стандарта 802.11, который как раз может конфликтовать с сигналами Bluetooth, для чего и применяется скачкообразная перестройка частоты.

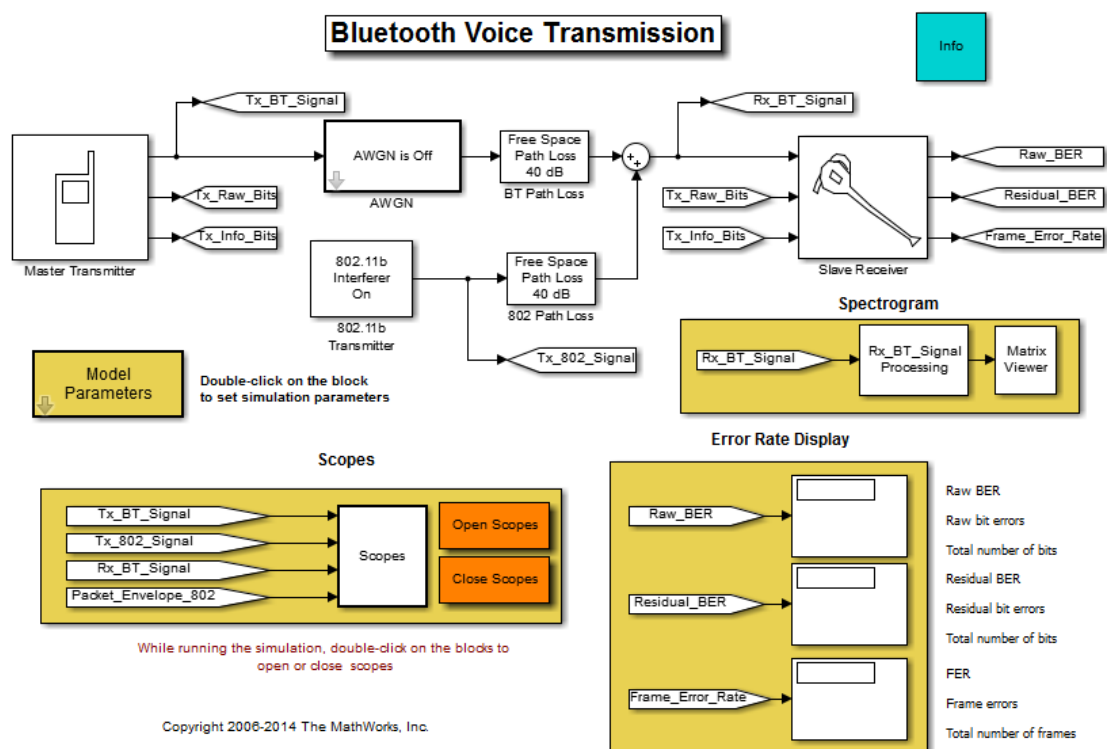


Рис. 5.61. Модель Bluetooth в MATLAB R2015b

### Результаты моделирования.

В результате моделирования данной схемы система строит три графика: спектр сигнала, временную форму сигнала и зависимость изменения рабочей частоты во времени (скачкообразная перестройка). На графике ниже представлен спектр Bluetooth сигнала в один из моментов времени. Одним из минусов метода перестройки частоты в системе Bluetooth являются задержки, которые хорошо видны на данной диаграмме при моделировании, также о них будет сказано ниже.

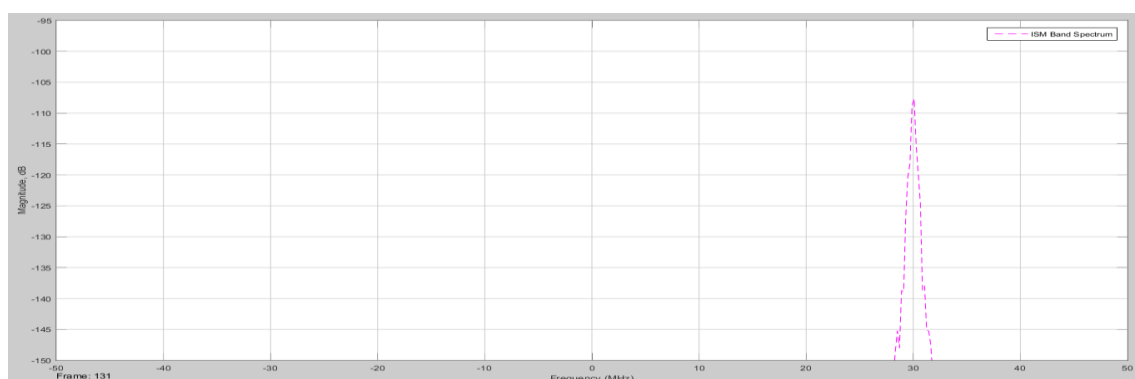


Рис. 5.61. Спектр Bluetooth без мешающего сигнала 802.11

Временная форма сигнала представляет просто набор битов, как и во многих современных системах связи. О значениях каждого бита (структуре кадра) была сказано ранее.

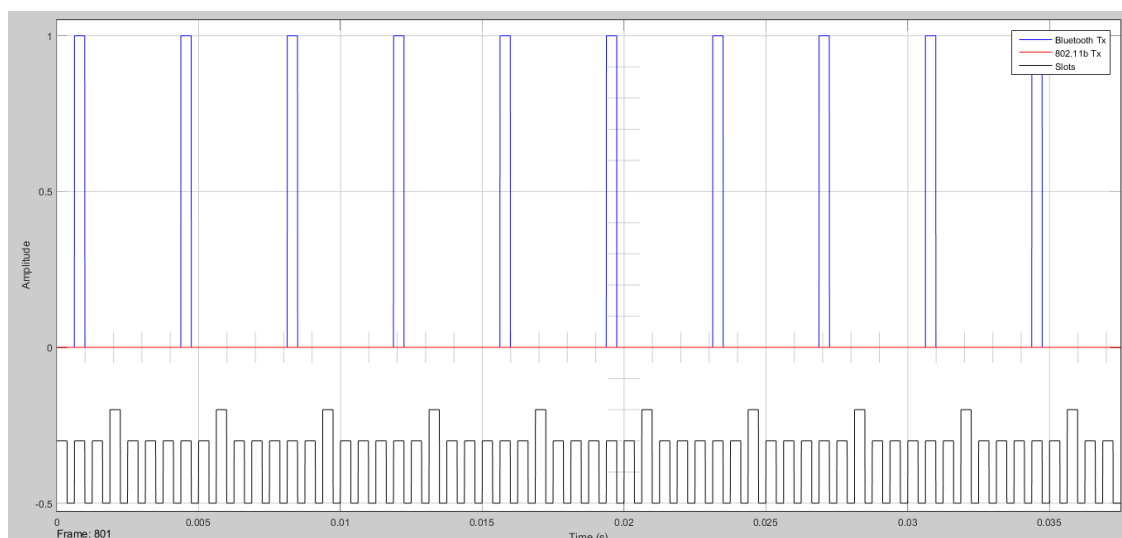


Рис. 5.62. Временная диаграмма Bluetooth без мешающего сигнала 802.11

На рисунке 3.63 хорошо видно изменение частоты от времени. На рисунке на оси абсцисс представлена частота, а на оси ординат время. Видно, что по оси времени перестройка с одной частоты на другую занимает определенное время, что относят к недостаткам системы Bluetooth.

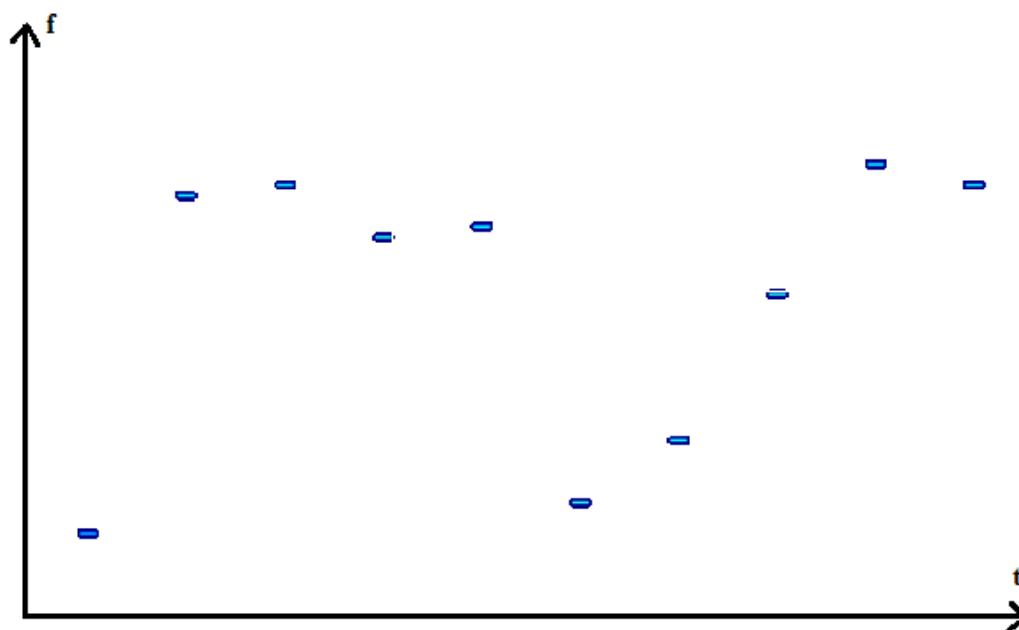


Рис. 5.63. Пример скачков частоты Bluetooth во времени без мешающего сигнала 802.11(WiFi)

На рисунке 5.64 представлен спектр вместе с мешающим сигналом. Здесь прекрасно видно, почему для построения системы Bluetooth был выбран алгоритм FHSS, который позволяет ему работать в одном диапазоне частот со стандартом 802.11 не мешая друг другу.

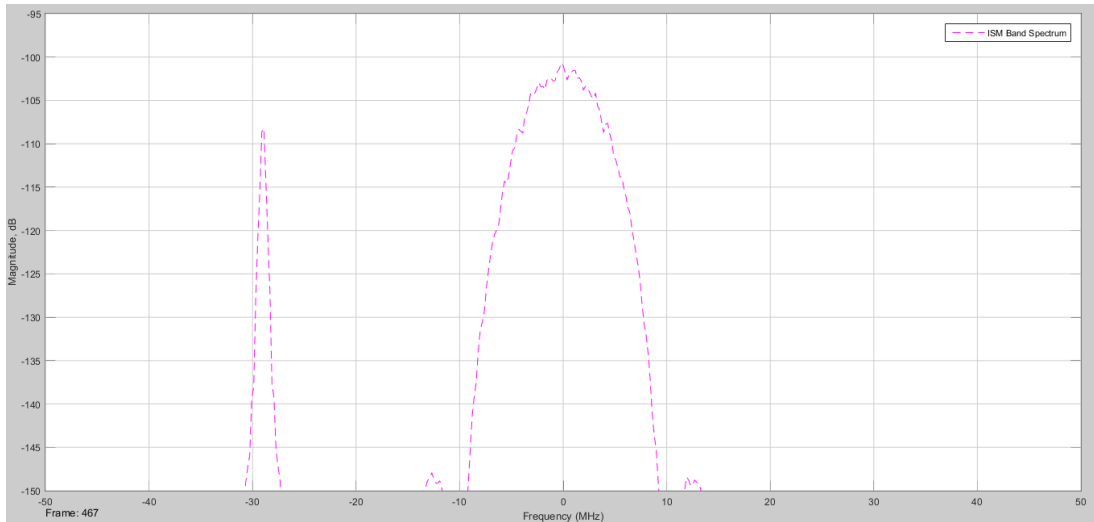


Рис. 5.64. Спектр Bluetooth с мешающим сигналом 802.11

Благодаря тому, что спектры сигналов разнесены в частотной области перекрытие их во временной, не играет большой роли, т.к. сигналы можно без проблем разделить.

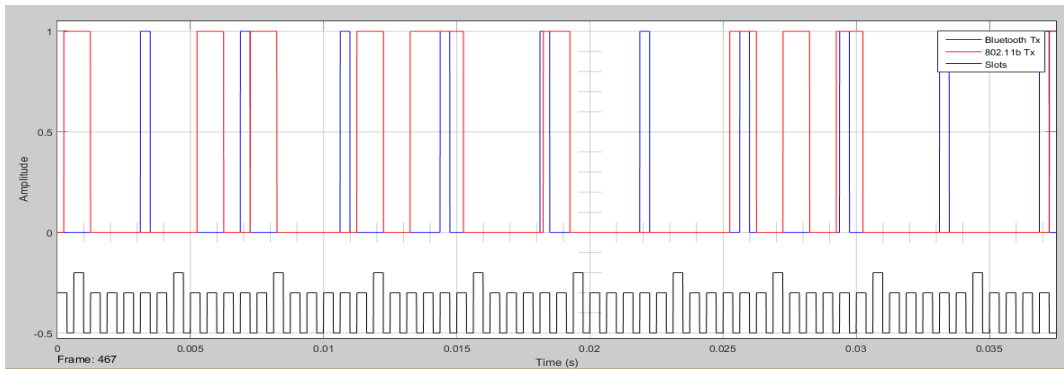


Рис. 5.65. Временная диаграмма Bluetooth с мешающим сигналом 802.11

Из рисунка ниже прекрасно видно, что во время работы устройства стандарта 802.11 рабочая частота системы Bluetooth находится достаточно далеко по спектру, а в некоторые моменты занимает свободный диапазон стандарта 802.11

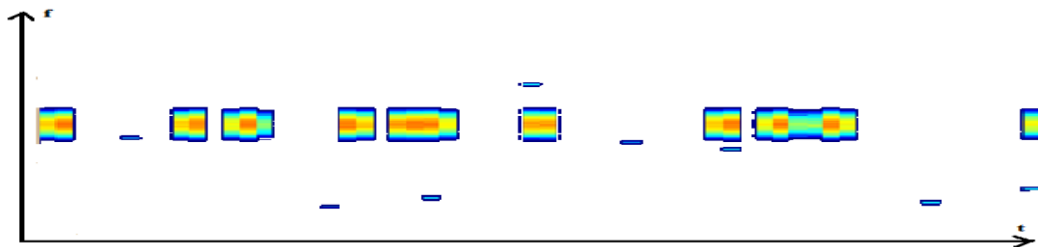


Рис. 5.66. Пример скачков частоты Bluetooth во времени с мешающим сигналом 802.11

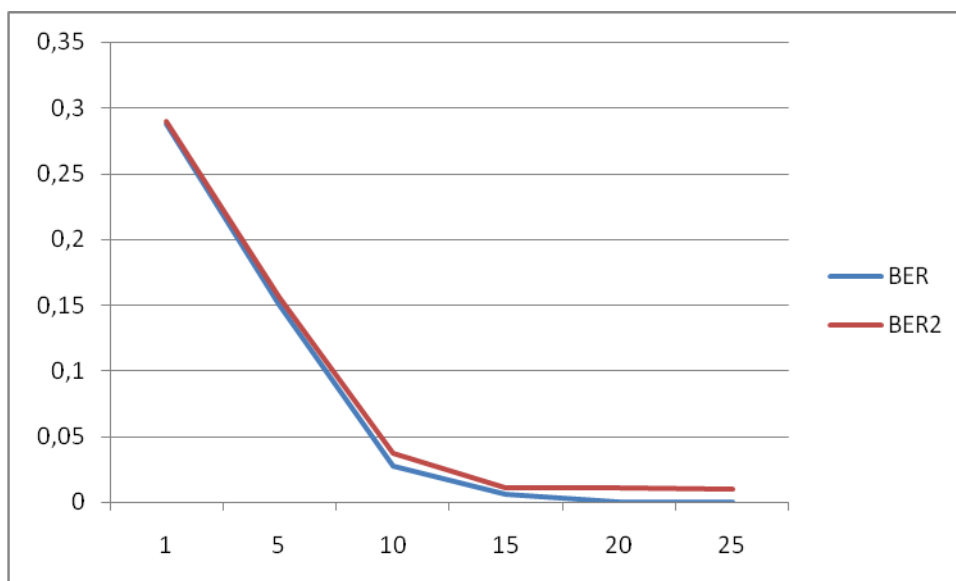


Рис. 5.67. Зависимость BER от SNR. Красным цветом (верхняя кривая) выделен график при включенном мешающем сигнале 802.11

Благодаря алгоритму FHSS система не сильно подвержена влиянию других стандартов передачи данных, работающих в том же диапазоне частот.

В разделе покан технологии передачи данных 802.15.1 Bluetooth, а также использована модель передачи звука по такой системе в системе Simulink.

С помощью модели были построены временная диаграмма сигнала, спектр и FHSS спектр сигнала BLUETOOTH при воздействии мешающего сигнала и без него. Также была построена зависимость BER от SNR.

На основе графиков зависимости BER от SNR (рисунок 5.67) видно, что мешающий сигнал 802.11 оказывает незначительное влияние на передачу данных. На рисунке 5.66 видно, что во время передачи сигнала 802.11, сигнал Bluetooth совершает скачок на другую частоту, что также хорошо видно на рисунке 5.64.

## 5.6. Имитационное моделирование системы мобильной связи стандарта IEEE 802.16 (WiMAX)

Существующие системы проводной цифровой связи уже не могут в полной мере удовлетворять растущим потребностям высокоскоростного широкополосного доступа. Важнейшими их недостатками являются длительные сроки прокладки, сложности расширения, высокие затраты, проблема "последней мили". Основной и является так называемая проблема "последней мили". Высокоскоростные цифровые соединительные линии DSL (Digital Subscriber Line) не снимают этой проблемы.

Технология WiMAX позволяет разрешить эту проблему в кратчайшие сроки, так как не требует прокладки соединительных линий к зданиям. Значительно проще развернуть по городу сеть базовых станций (наподобие сети станций сотовой связи). Каждая базовая станция в типовом варианте покрывает зону радиусом 6—8 км



(возможны зоны радиусом до 30—50 км). В этой зоне каждая базовая станция (BS) по схеме "точка-многоточка" способна передавать/принимать сигналы от сотен зданий, внутри которых находится телекоммуникационное оборудование пользователей.

Под аббревиатурой WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) понимается технология операторского класса с высоким качеством сервиса, которая основана на семействе стандартов IEEE 802.16, разработанных международным институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). Обеспечивает мультисервисность, гибкое распределение частот, задание приоритетов различным видам трафика, возможность обеспечения разного уровня качества (QoS), поддержка интерфейсов IP. Эта технология позволяет параллельно передавать голос, мультимедийную информацию и цифровые данные по одному каналу связи. Важным преимуществом является возможность быстро наращивать емкость и расширять территорию связи.

Технология WiMAX представляет прекрасную возможность обеспечивать беспроводной доступ всем пользователям цифрового оборудования, включая оборудование беспроводных локальных сетей, технологии Wi-Fi, к глобальным сетям, являясь связующим звеном между локальными сетями и глобальными сетями.

### **Теоретическая часть. Общие принципы построения сетей WiMAX**

#### **Стандарты IEEE 802.16. Форум WiMAX.**

При переходе к созданию систем широкополосного радиодоступа с интеграцией услуг стало понятно, что основополагающие принципы, заложенные в беспроводные системы на предыдущих этапах, нуждаются в существенной корректировке. На сигнальном уровне первостепенное значение приобрело оптимальное использование спектрального ресурса радиоканала при любых соотношениях "скорость - помехоустойчивость". На уровне протоколов стало необходимым обеспечивать заданный уровень качества обслуживания каждому абоненту сети.

Основным преимуществом сетей WiMAX по сравнению с другими технологиями, призванными решать аналогичные задачи, является относительно быстрое развертывание систем на достаточно больших территориях без проведения работ по прокладке кабеля и предоставление конечным пользователям каналов связи в единицы Мбит/с, что особенно актуально для мест с неразвитой сетевой инфраструктурой. Основным конкурентом сетей WiMAX являются системы связи четвертого поколения LTE E UTRA.

На сегодняшний день беспроводные сети городского масштаба представлены следующими стандартами:

- IEEE 802.16e-2005, 2009 (WiMAX);

- ETSI HiperMAN;
- IEEE 802.20 (WBWA).

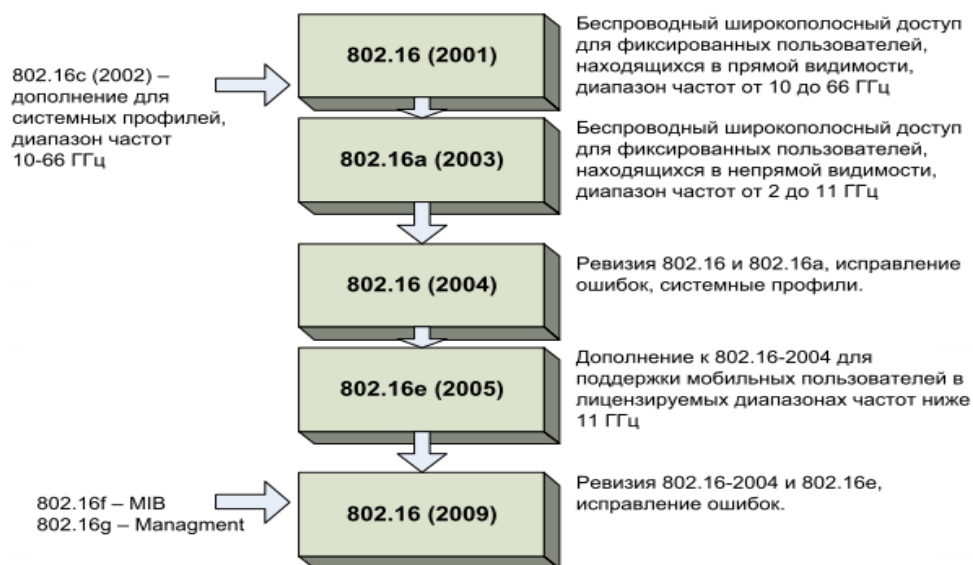


Рисунок 5.1 – Эволюция стандартов IEEE 802.16

Таблица 5.1 – Краткие характеристики стандартов, входящих в семейство IEEE 802.16

Название стандарта	IEEE 802.16	IEEE 802.16a	IEEE 802.16e
Частотный диапазон	10-66 ГГц	2-11 ГГц	2-6 ГГц
Скорость передачи информации	32-135 Мбит/с	до 75 Мбит/с	до 15 Мбит/с
Модуляция	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM
Ширина полосы частот	20, 25 и 28 МГц	Регулируемая 1,5 – 20 МГц	Регулируемая 1,5 – 20 МГц
Радиус действия	2-5 км	7-10 км, макс. радиус 50 км	2-5 км
Условия работы	Прямая видимость	Работа на отраженных лучах	Работа на отраженных лучах

Для обеспечения работоспособности систем в диапазоне 10-66 ГГц, вследствие относительно малой длины волны, требуется наличие прямой видимости между передатчиком и приемником. В таких условиях при анализе канала связи многолучевостью среды можно пренебречь. Данные передаются на одной несущей.

Ширина полосы частот одного канала составляет 20, 25 или 28 МГц, что позволяет достигать скорости передачи данных до 135 Мбит/с.

В диапазоне частот 2-11 ГГц за счет увеличения длины волны возможен сценарий взаимодействия передатчика и приемника в условиях отсутствия прямой видимости. При этом необходимо применять более сложные (по сравнению с системами, функционирующими в диапазоне частот 10-66 ГГц) методы регулировки мощности, различные способы борьбы с межсимвольной интерференцией. Для передачи данных используется одна или множество несущих (сигналы с OFDM).

Необходимо различать стандарты связи серии IEEE 802.16 (рисунок 2.1) и форум WiMAX (рисунок 2.2). Стандарты серии IEEE 802.16 — это множество стандартов, определяющих беспроводные сети городского масштаба (WMAN — Wireless Metropolitan Area Network), разработаны для обеспечения беспроводным широкополосным доступом стационарных и мобильных пользователей. Форум WiMAX является некоммерческой организацией для продвижения и сертификации устройств беспроводного широкополосного доступа, основанных на согласованном стандарте IEEE 802.16/ETSI HiperMAN. Сотрудничает с поставщиками услуг, производителями оборудования, производителями тестового оборудования, сертификационными лабораториями и поставщиками программно-аппаратных ресурсов для обеспечения соответствия ожиданиям заказчика и государственным стандартам.

Стандарты серии IEEE 802.16 определяет радиointерфейс для систем широкополосного беспроводного доступа (уровни MAC и PHY) с фиксированными и мобильными абонентами в диапазоне частот 1-66 ГГц, рассчитанных на внедрение в городских распределенных беспроводных сетях операторского класса. Сети, построенные на основе этих стандартов, займут промежуточное положение между локальными сетями (IEEE 802.11x) и региональными сетями (WAN), где планируется применение разрабатываемого стандарта IEEE 802.20. Указанные стандарты совместно со стандартом IEEE 802.15 (PAN — Personal Area Network) и IEEE 802.17 (мосты уровня MAC) образуют иерархию стандартов беспроводной связи.

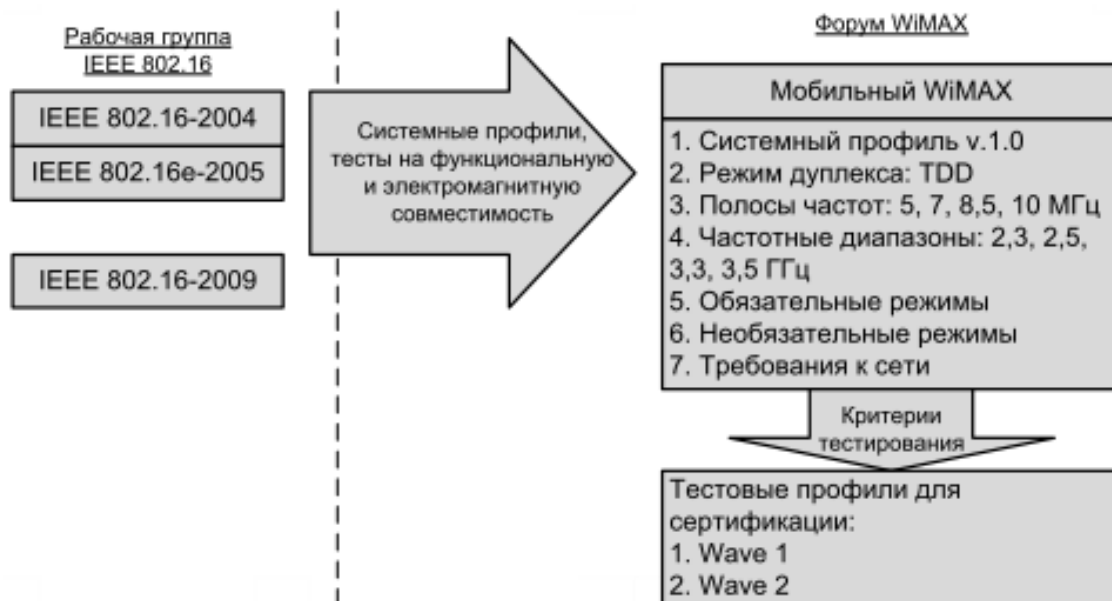


Рис. 5.2 – Стандарты серии IEEE 802.16 и форум WiMAX

Структура стандартов IEEE 802.16 представлена на рисунке 5.3. Стандарты описывают MAC- и PHY- уровни семиуровневой эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). При этом уровень MAC делится на подуровни конвергенции, общей части и безопасности.

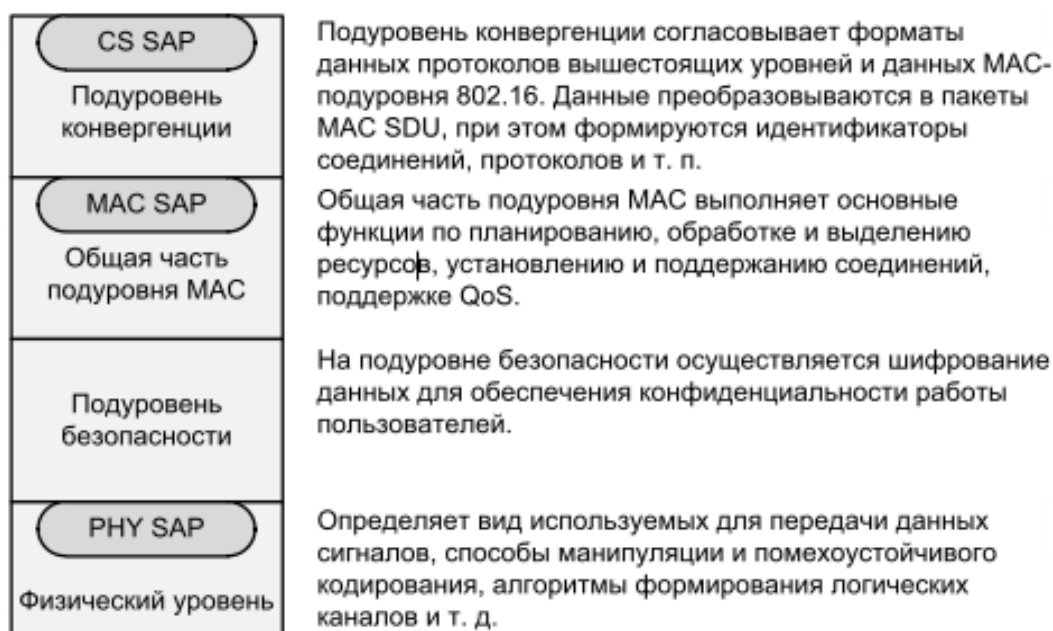


Рис. 5.3 – Структура стандартов IEEE 802.16

### Архитектура сетей WiMAX IEEE 802.16. Сетевой уровень

Базовая станция (БС, BS — Base Station) размещается в здании или на вышке и осуществляет связь с абонентскими станциями (АС, SS — Subscriber Station) по схеме — «точка – мультиточка» (Point to Multipoint — PMP). Возможен сеточный режим связи (Mesh — сетка связей — «точка – точка» — PTP), когда любые клиенты (АС) могут осуществлять связь между собой непосредственно, а антенные системы, как правило, являются ненаправленными. БС предоставляет соединение с основной сетью и

радиоканалы к другим станциям. Радиус действия БС может достигать 30 км (в случае прямой видимости) при типовом радиусе сети 6–8 км. АС может быть радиотерминалом или повторителем, который используется для организации локального трафика. Трафик может проходить через несколько повторителей, прежде чем достигнет клиента. Антенны в этом случае являются направленными.

Канал связи предполагает наличие двух направлений передачи: восходящий канал (АС – БС, uplink) и нисходящий (БС – АС, downlink). Эти два канала используют разные неперекрывающиеся частотные диапазоны при частотном дуплексе и различные интервалы времени при временном дуплексе.

Простейший способ представления архитектуры сетей WiMAX заключается в их описании как совокупности БС, которые располагаются на крышах высотных зданий или вышках, и клиентских приемо-передатчиков (рисунок 3.4).



Рис. 5.4 – Схематичное изображение сети WiMAX

Радиосеть обмена данными между БС и АС работает в СВЧ-диапазоне от 2 до 11 ГГц. Такая сеть в идеальных условиях может обеспечить техническую скорость передачи информации до 75 Мбит/с и не требует того, чтобы БС находилась на расстоянии прямой видимости от пользователя.

Диапазон частот от 10 до 66 ГГц используется для установления соединения между соседними базовыми станциями при условии, что они располагаются в зоне прямой видимости друг от друга. Так как в городской среде это условие может оказаться невыполнимым, связь между базовыми станциями иногда организуют посредством прокладки кабелей.

При более детальном рассмотрении сеть WiMAX можно описать как совокупность беспроводного и базового (опорного) сегментов. Первый описывается в стандарте IEEE 802.16, второй определяется спецификациями WiMAX Forum. Базовый сегмент объединяет все аспекты, не относящиеся к абонентской радиосети, то есть связь базовых станций друг с другом, связь с локальными сетями. Базовый сегмент основывается на IP-протоколе и стандарте IEEE 802.3-2005 (Ethernet). Однако само описание архитектуры в части, не относящейся к беспроводной клиентской сети, содержится в документах WiMAX Forum, объединенных под общим названием – "Network Architecture".

Таблица 5.2 – Основные режимы для стандарта IEEE 802.16 в РФ

Диапазон частот, ГГц	Разрешенные полосы частот, МГц	Общая ширина выделенных полос, МГц	Тип беспроводного доступа
2,5	2500 – 2530 2560 – 2570 2620 – 2630 2660 – 2670 2680 – 2690	70	мобильный
3,5	3400 – 3450 3500 – 3550	100	фиксированный
5	5150 – 5350 5650 – 5725 5725 – 6425	975	фиксированный

В этих спецификациях к сетям WiMAX предъявляются такие требования, как независимость архитектуры от функций и структуры транспортной IP-сети. В то же время, должны обеспечиваться услуги, основанные на применении IP-протокола, а также мобильная телефония на основе VoIP и мультимедийные услуги. Обязательным является условие поддержки архитектурой протоколов IPv4 и IPv6. Сети WiMAX должны быть легко масштабируемыми и гибко изменяемыми и основываться на принципе декомпозиции (строиться на основе стандартных логических модулей, объединяемых через стандартные интерфейсы). Свойства масштабируемости и гибкости необходимо обеспечивать по таким эксплуатационным характеристикам, как плотность абонентов, географическая протяженность зоны покрытия, частотные диапазоны, топология сети, мобильность абонентов. Сети WiMAX должны поддерживать взаимодействие с другими беспроводными или проводными сетями.

Большое значение имеет способность обеспечивать различные уровни качества обслуживания QoS.

### Физический уровень WiMAX

На физическом уровне систем WiMAX над передаваемыми битами осуществляются следующие канальные процедуры (рисунок 2.5): скремблирование (рандомизация), помехоустойчивое кодирование, перемежение, кодирование повторением и модуляция.

Полученные модуляционные символы делятся на логические подканалы, и с использованием ОБПФ формируется отсчет передаваемого OFDMA-символа.

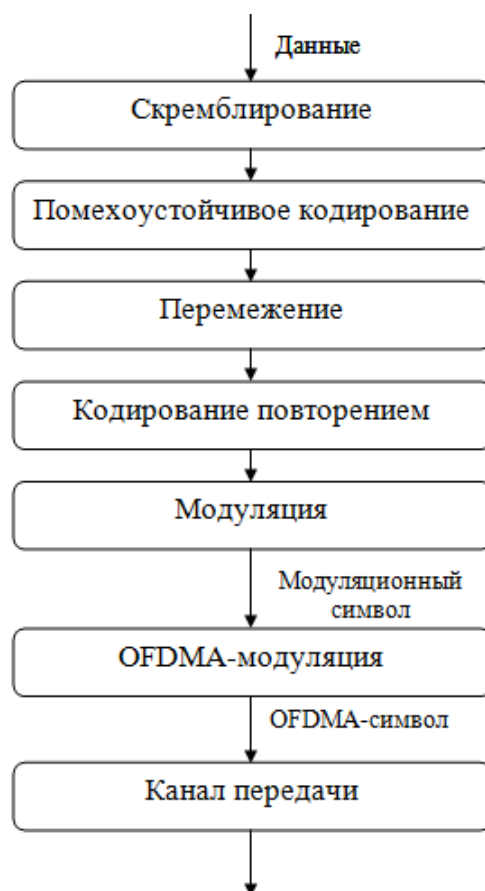


Рис. 5.5. Преобразования данных на физическом уровне WiMAX

На физическом уровне в стандарте IEEE 802.16-2004 определены три метода передачи данных: метод модуляции одной несущей (SC), метод ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и метод множественного доступа на основе такого мультиплексирования (OFDMA) [2].

Спецификация физического уровня WirelessMAN-OFDM является наиболее интересной с точки зрения практической реализации. Она базируется на технологии OFDM, что значительно расширяет возможности оборудования, в частности, позволяет работать на относительно высоких частотах в условиях отсутствия прямой видимости. Кроме того, в нее включена поддержка топологии «каждый с каждым» (mesh) [3], при которой абонентские устройства могут одновременно функционировать и как базовые

станции, что сильно упрощает развертывание сети и помогает преодолеть проблемы прямой видимости.

### Скремблирование

Скремблирование — это сложение по модулю два передаваемых битов с элементами ПСП, которую формирует генератор ПСП с задающим полиномом вида  $x^{15} + x^{14} + 1$ . Генератор ПСП инициализируется вектором 011011100010101.

Скремблирование осуществляется только над информационными битами. Причем при скремблировании каждого блока данных, подлежащих помехоустойчивому кодированию, сдвигающий регистр скремблера инициализируется заново. Байты данных поступают на вход скремблера начиная со старшего значащего разряда.

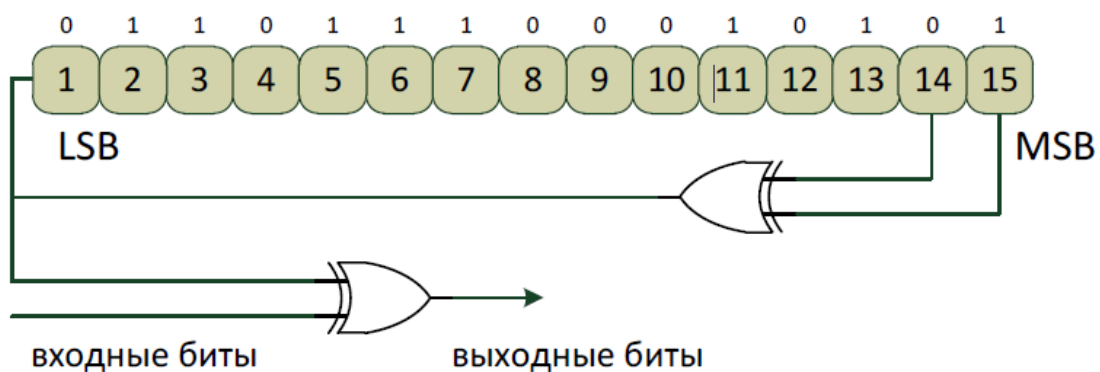


Рис. 5.6. Схема скремблера

### Помехоустойчивое кодирование

Многолучевое распространение радиосигнала может приводить к ослаблению и даже полному подавлению некоторых поднесущих вследствие интерференции прямого и задержанного сигналов. Для решения этой проблемы используется помехоустойчивое кодирование. В стандарте IEEE 802.16-2004 предусмотрены как традиционные технологии помехоустойчивого кодирования, так и относительно новые методы. К традиционным относится сверточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби и коды Рида-Соломона. К относительно новым — блочные и сверточные турбокоды.

### Перемежение

После осуществления скремблирования и помехоустойчивого кодирования, над битами каждого блока должно быть выполнено двухэтапное перемежение. Первый этап гарантирует, что соседние в исходной последовательности биты будут распределены не в соседние поднесущие. Второй этап обеспечивает распределение соседних битов или в наиболее, или в наименее значимые биты сигнального созвездия, что предотвратит длительные последовательности наименее надежных битов.

### Модуляция

В системах беспроводного широкополосного доступа используют сигналы как



двоичной (ФМ-2), так и многопозиционной (ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64 и т. п.) модуляции. Сигналы многопозиционной фазовой модуляции (МФМ) характеризуются высокой частотной эффективностью, однако при этом вследствие уменьшения евклидовых расстояний между сигнальными точками существенно снижается помехоустойчивость приема, что при фиксированной вероятности ошибки эквивалентно ухудшению энергетической эффективности. Сигналы КАМ являются некоторым компромиссом, выигрывая у МФМ по энергетической эффективности, но уступая по спектральной, что может компенсироваться применением помехоустойчивого кода. По этой причине в сетях WiMAX IEEE 802.16e-2005, 2009 применяются методы модуляции ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64.

При отображении бит на сигнальную плоскость применяется манипуляционный код Грея. Соответствующие сигнальные созвездия представлены на рисунке 3.7.

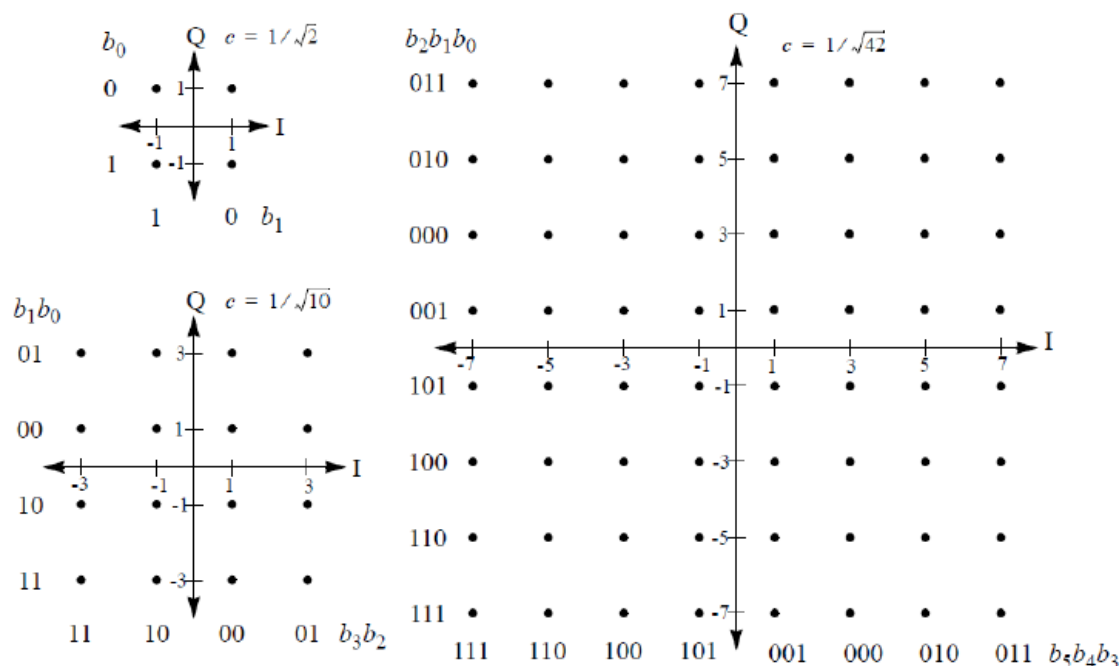


Рисунок 3.7 – Сигнальные созвездия, соответствующие методам модуляции ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64, IEEE 802.16e-2005

### Модуляция OFDM

При формировании OFDM-сигнала [4] цифровой поток данных делится на несколько подпотоков, и каждая поднесущая связывается со своим подпотоком данных. Амплитуда и фаза поднесущей вычисляются на основе выбранной схемы модуляции. Согласно стандарту, отдельные поднесущие могут модулироваться с использованием бинарной фазовой манипуляции (BPSK), квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) или квадратурной амплитудной манипуляции (QAM) порядка 16 или 64. В передатчике амплитуда как функция фазы преобразуется в функцию от времени с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). В приемнике с помощью быстрого

преобразования Фурье (БПФ) осуществляется преобразование амплитуды сигналов как функции от времени в функцию от частоты.

Применение преобразования Фурье позволяет разделить частотный диапазон на поднесущие, спектры которых перекрываются, но остаются ортогональными. Ортогональность поднесущих означает, что каждая из них содержит целое число колебаний на период передачи символа. Как видно на рисунке 2.8, спектральная кривая любой из поднесущих имеет нулевое значение для «центральной» частоты смежной кривой. Именно эта особенность спектра поднесущих и обеспечивает отсутствие между ними интерференции.

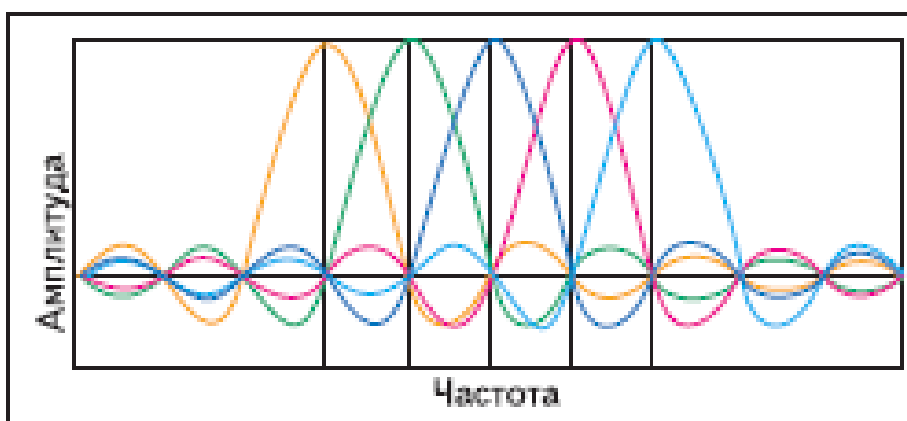


Рис. 5.8. Ортогональные поднесущие

Одним из главных преимуществ метода OFDM является его устойчивость к эффекту многолучевого распространения. Эффект вызывается тем, что излученный сигнал, отражаясь от препятствий, приходит к приемной антенне разными путями, вызывая межсимвольные искажения. Этот вид помех характерен для городов с разноэтажной застройкой из-за многократных отражений радиосигнала от зданий и других сооружений. Для того чтобы избежать межсимвольных искажений, перед каждым OFDM-символом вводится защитный интервал, называемый циклическим префиксом. Циклический префикс представляет собой фрагмент полезного сигнала, что гарантирует сохранение ортогональности поднесущих (но только в том случае, если отраженный сигнал при многолучевом распространении задержан не больше, чем на длительность циклического префикса). Кроме того, циклический префикс позволяет выбрать окно для преобразования Фурье в любом месте временного интервала символа (рисунок 3.9).

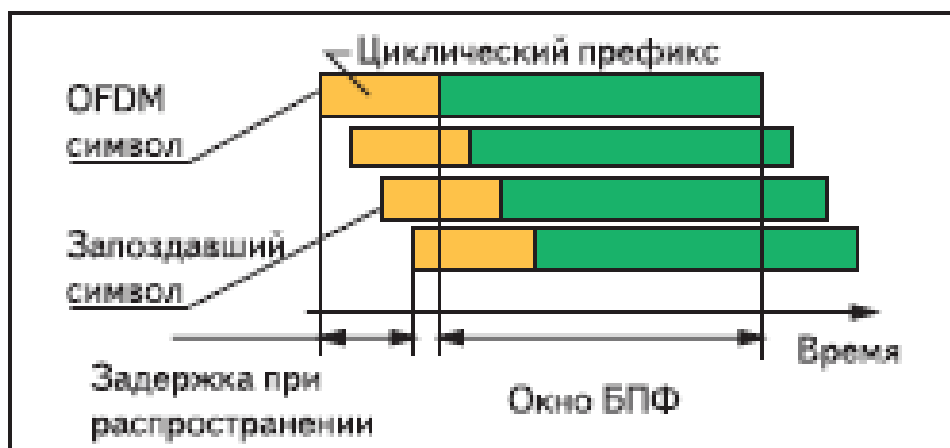


Рис. 5.9. Обработка OFDM-символа при многолучевом распространении

### Защита информации

В соответствии со стандартом, для предотвращения несанкционированного доступа и защиты пользовательских данных осуществляется шифрование всего передаваемого по сети трафика. Базовая станция (БС) WiMAX представляет собой модульный конструктив, в который при необходимости можно установить несколько модулей со своими типами интерфейсов, но при этом должно поддерживаться административное программное обеспечение для управления сетью. Данное программное обеспечение обеспечивает централизованное управление всей сетью. Логическое добавление в существующую сеть абонентских комплектов осуществляется также через эту административную функцию.

Абонентская станция (АС) представляет собой устройство, имеющее уникальный серийный номер, MAC-адрес, а также цифровую подпись X.509, на основании которой происходит аутентификация АС на БС. При этом, согласно стандарту, срок действительности цифровой подписи АС составляет 10 лет. После установки АС у клиента и подачи питания АС авторизуется на базовой станции, используя определенную частоту радиосигнала, после чего базовая станция, основываясь на перечисленных выше идентификационных данных, передает абоненту конфигурационный файл по TFTP-протоколу. В этом конфигурационном файле находится информация о поддиапазоне передачи (приема) данных, типе трафика и доступной полосе, расписание рассылки ключей для шифрования трафика и прочая необходимая для работы АС информация. Необходимый файл с конфигурационными данными создается автоматически, после занесения администратором системы АС в базу абонентов, с назначением последнему определенных параметров доступа.

После процедуры конфигурирования аутентификация АС на базовой станции происходит следующим образом:

1. Абонентская станция посылает запрос на авторизацию, в котором содержится сертификат X.509, описание поддерживаемых методов шифрования и дополнительная информация.

2. Базовая станция в ответ на запрос на авторизацию (в случае достоверности запроса) присылает ответ, в котором содержится ключ на аутентификацию, зашифрованный открытым ключом абонента, 4-битный ключ для определения последовательности, необходимый для определения следующего ключа на авторизацию, а также время жизни ключа.

3. В процессе работы АС через промежуток времени, определяемый администратором системы, происходит повторная авторизация и аутентификация, и в случае успешного прохождения аутентификации и авторизации поток данных не прерывается.

В стандарте используется протокол РКМ (Privacy Key Management), в соответствии с которым определено несколько видов ключей для шифрования передаваемой информации:

- Authorization Key (АК) — ключ, используемый для авторизации АК на базовой станции;
- Traffic Encryption Key (ТЕК) — ключ, используемый для криптозащиты трафика;
- Key Encryption Key (КЕК) — ключ, используемый для криптозащиты передаваемых в эфире ключей.

Согласно стандарту, в каждый момент времени используются два ключа одновременно, с перекрывающимися временами жизни. Данная мера необходима в среде с потерями пакетов (а в эфире они неизбежны) и обеспечивает бесперебойность работы сети. Имеется большое количество динамически меняющихся ключей, достаточно длинных, при этом установление безопасных соединений происходит с помощью цифровой подписи. Согласно стандарту, криптозащита выполняется в соответствии с алгоритмом 3-DES, при этом отключить шифрование нельзя. Опционально предусмотрено шифрование по более надежному алгоритму AES

### **Практическая часть. Описание экспериментальной установки и методики измерений**

Работа выполняется с использованием симулятора физического уровня стандарта IEEE 802.16-2004 в программной среде Simulink. Для запуска программы, в командную строку MATLAB необходимо ввести "commwman80216dstbc" и нажать Enter.

Схема исследуемой системы приведена на рисунке 3.10.

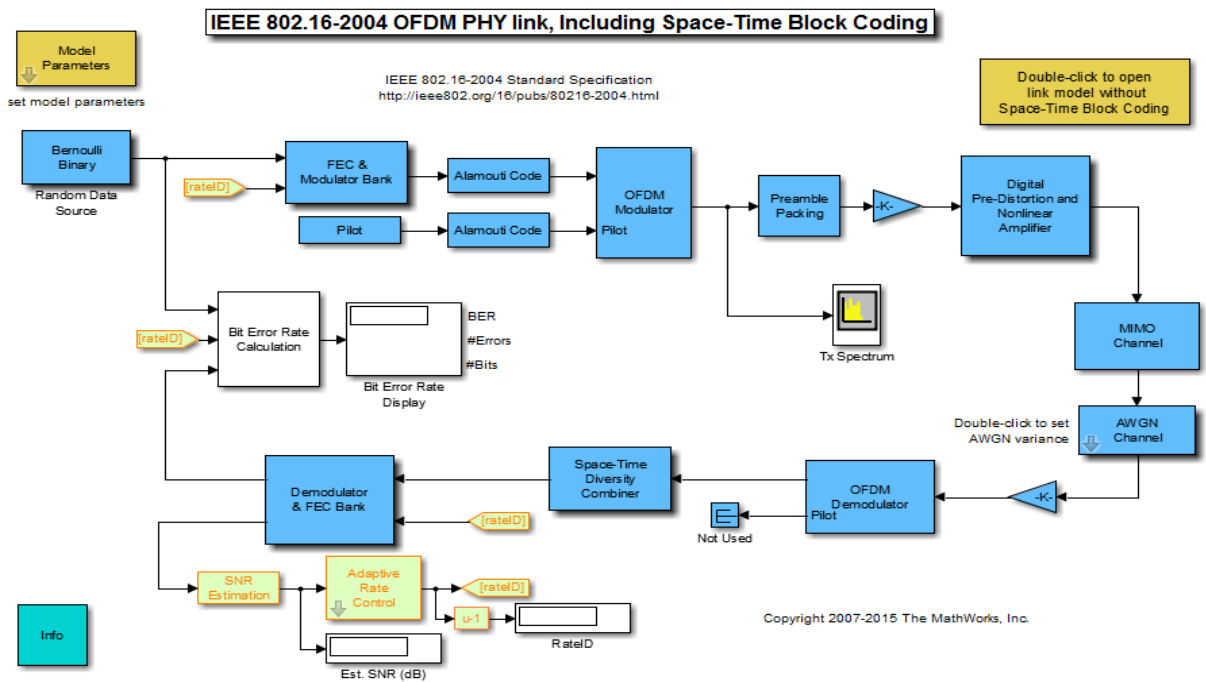


Рис. 5.10. Модель IEEE 802.16-2004 OFDM в MATLAB 2015b

Параметры источника случайной последовательности Bernulli Binary

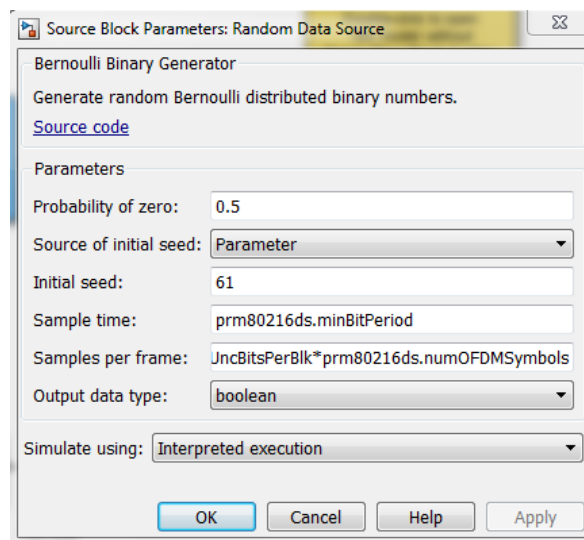


Рис. 5.11. Параметры блока Bernulli Binary

При проведении симуляции существует возможность изменения ряда параметров системы в следующих блоках:

Общие параметры модели (блок «Model Parameters», рисунок 5.12).

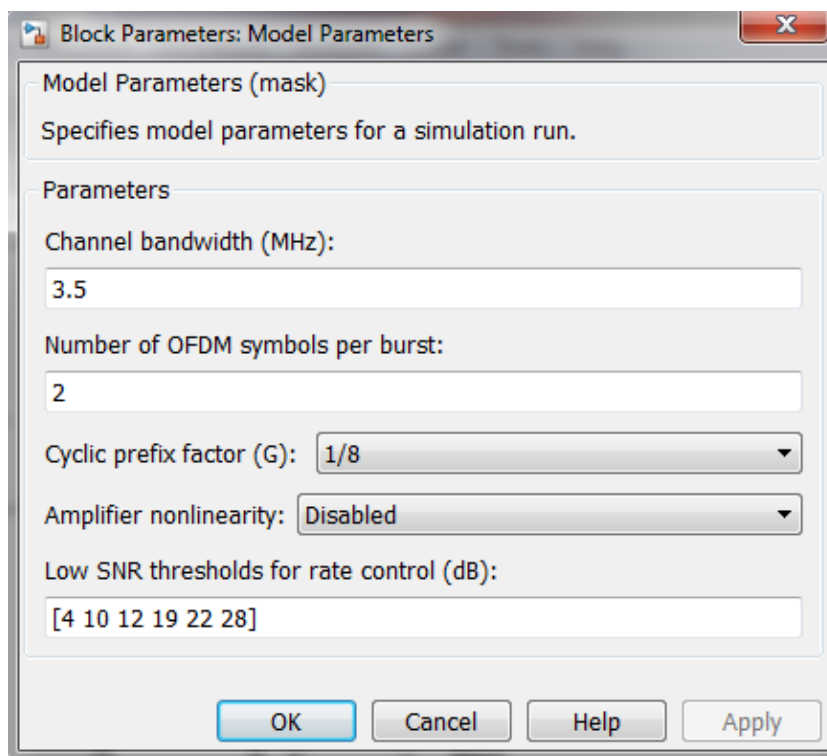


Рис. 5.13. Параметры системы, изменяемые в блоке «Model Parameters»

Блок помехоустойчивого кодирования и модуляции («FEC & Modulator Bank», рисунок 5.5) производит формирование сигнально-кодовой конструкции (СКК) определенного вида в зависимости от условий передачи.

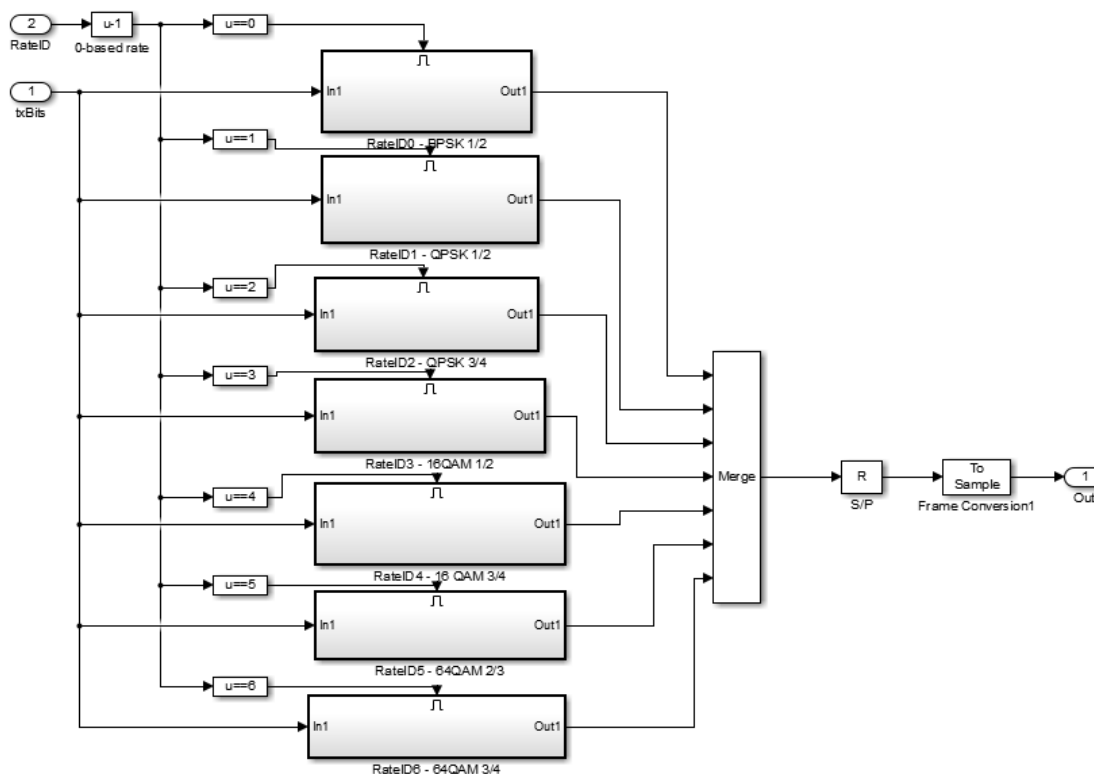


Рис. 5.14. Состав блока «FEC & Modulator Bank»

Рассмотрим состав каждого входящего блока:

Состав блока модулятора BPSK 1/2:

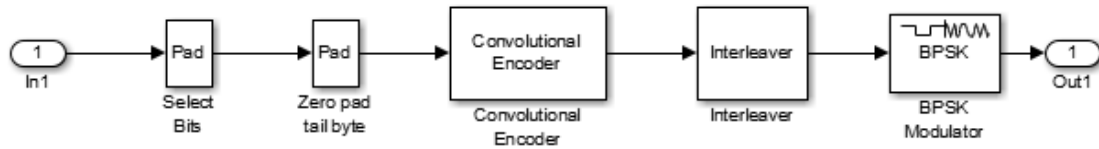


Рис. 5.15 – Состав блока модулятора «BPSK 1/2»

Состав блока модулятора QPSK 1/2:

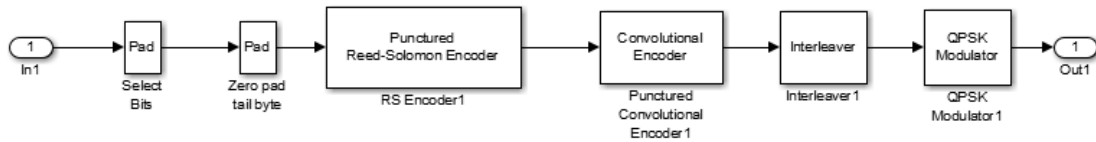


Рис. 5.16 – Состав блока модулятора «QPSK 1/2»

Состав блока модулятора QPSK 3/4:

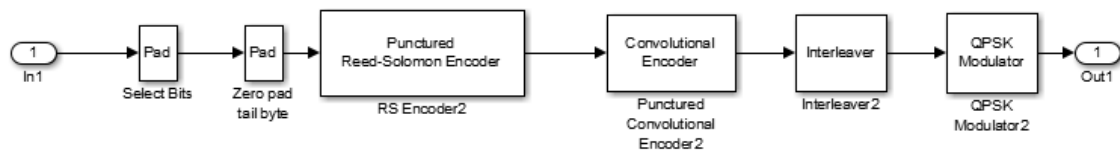


Рис. 5.17 – Состав блока модулятора «QPSK 3/4»

Состав блока модулятора 16QAM 1/2:

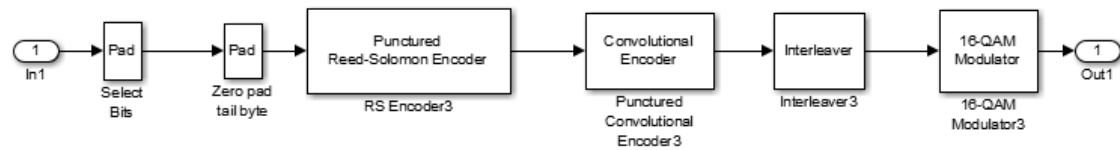


Рис. 5.18. Состав блока модулятора «16QAM 1/2»

Состав блока модулятора 16QAM 3/4:

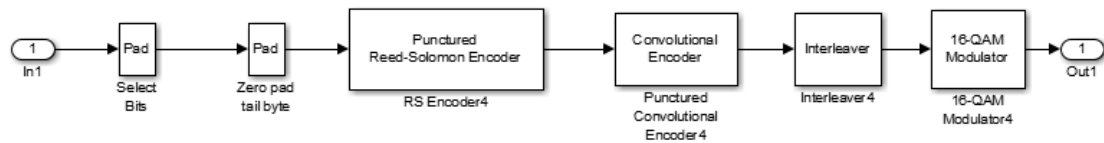


Рис. 5.19. Состав блока модулятора «16QAM 3/4»

Состав блока модулятора 64QAM 2/3:

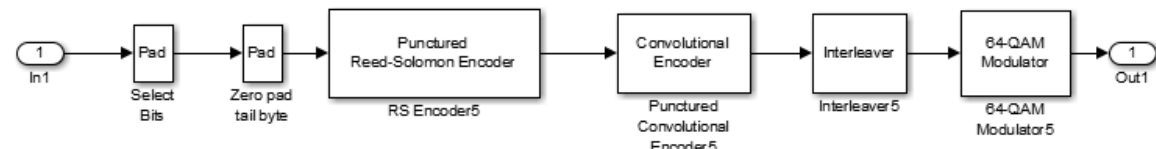


Рис. 5.20. Состав блока модулятора «64QAM 2/3»

Состав блока модулятора 64QAM 3/4:

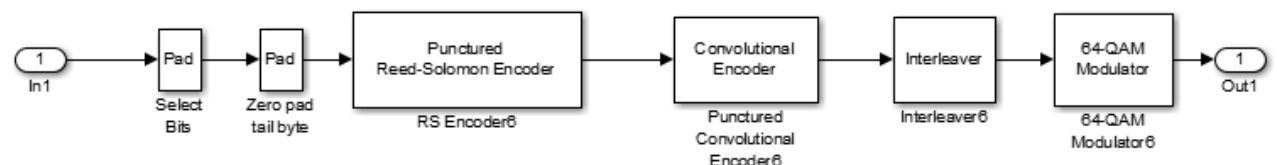


Рис. 5.21. Состав блока модулятора «64QAM 3/4»

Формирование сигнально-кодовых конструкций в каждом блоке происходит следующим образом: к поступающим информационным битам добавляется определяется «хвост» из нулевых бит, полученная последовательность кодируется блочным циклическим кодом Рида-Соломона. Следующий этап кодирования – сверточный код с использованием Треллис-структуры, затем, после перемежения, последовательность бит модулируется определенным образом для передачи по каналу.

В каждом из блоков на рисунках используется одинаковая последовательность блоков, отличающихся своими параметрами. Например для блока «16QAM 1/2» блоки имеют параметры.

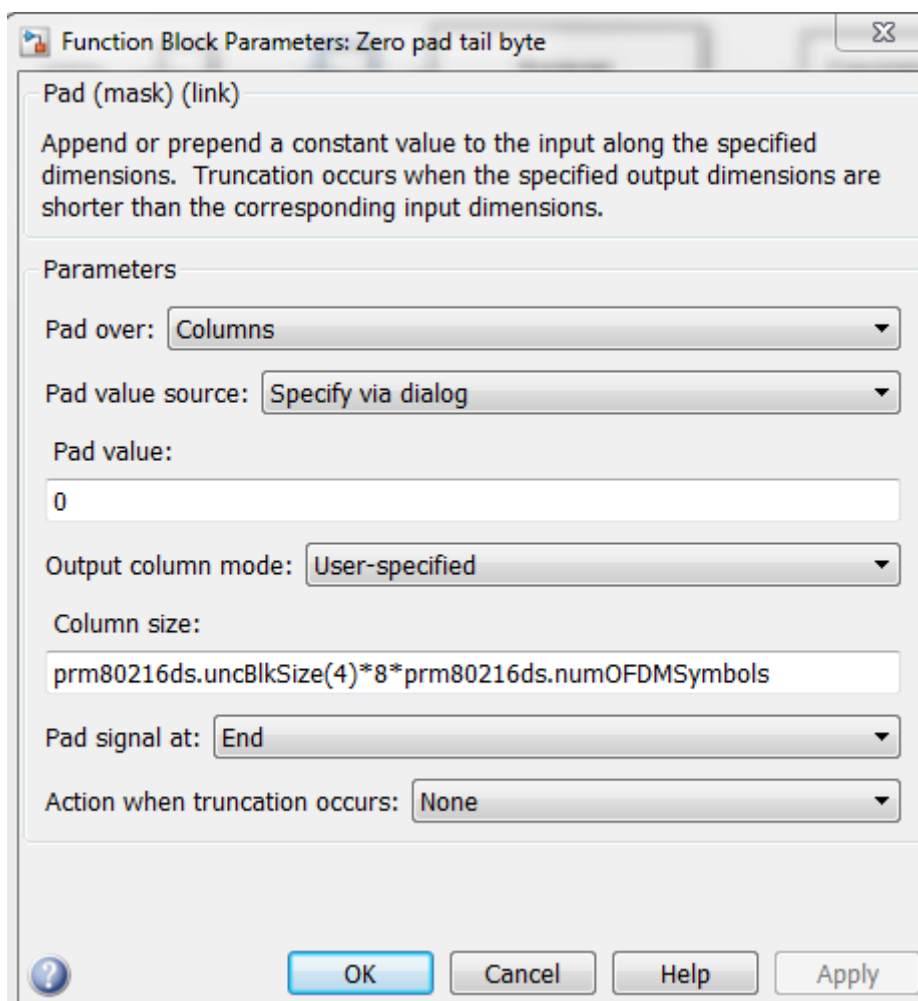


Рис. 5.22. Состав блока «Zero pad tail byte 16QAM 1/2»



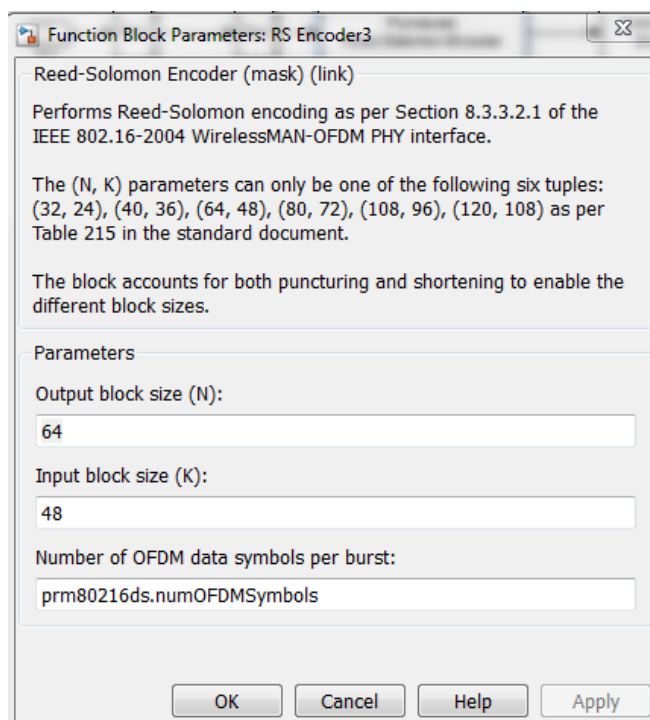


Рис. 5.23. Состав блока кодера Рида-Соломона «Puncured Reed-Solomon Encoder 16QAM 1/2»

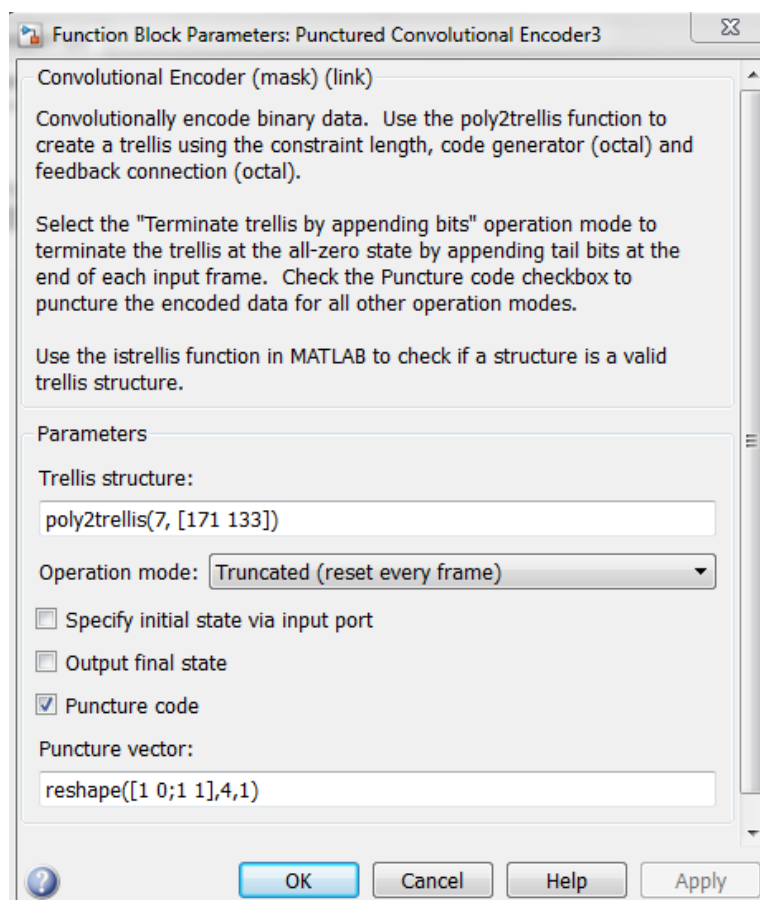


Рис. 5.24. Состав блока сверточного кодера «Convolutinal Encoder 16QAM 1/2»

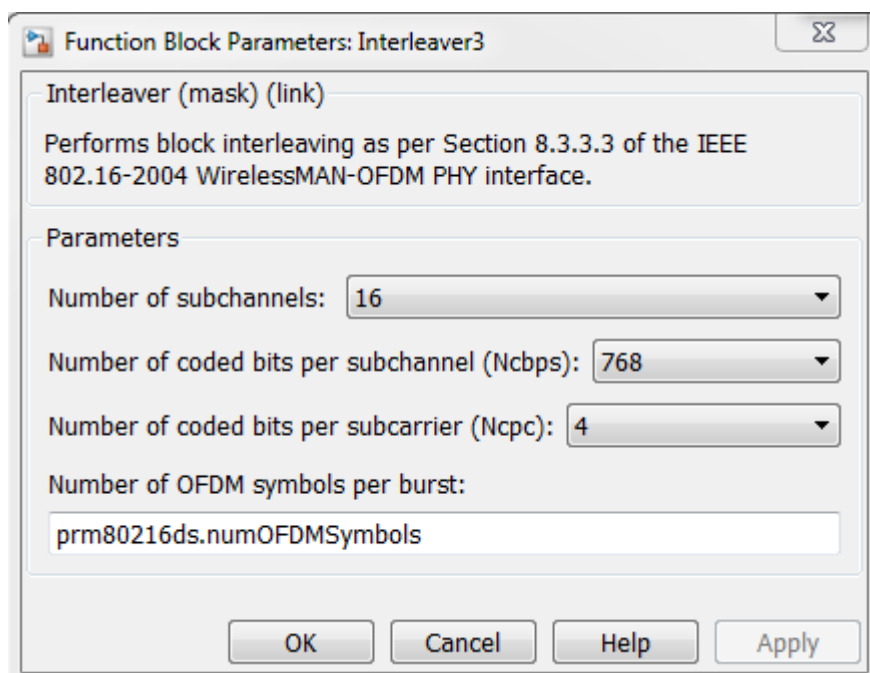


Рис. 5.25. Состав блока перемежителя «Interleaver 16QAM 1/2»

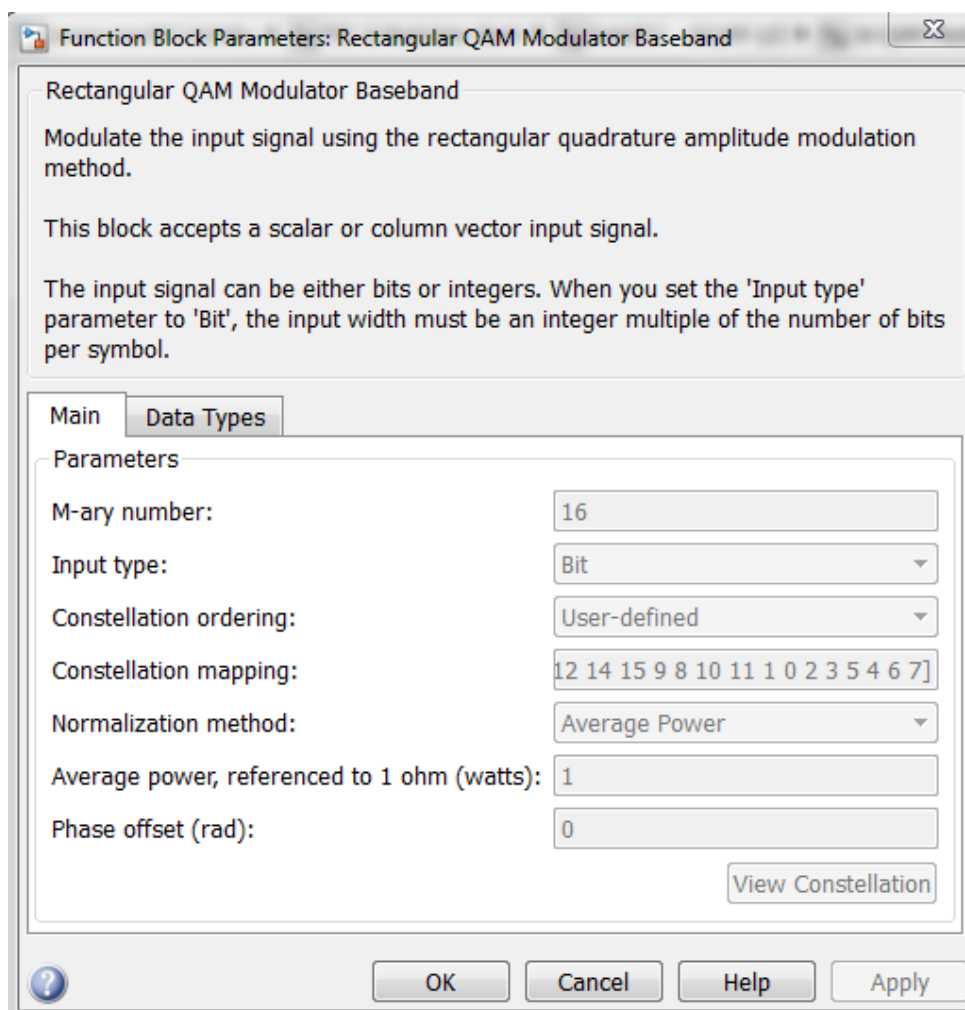


Рис. 5.26. Состав блока модулятора «16-QAM Modulator 16QAM 1/2»

Таблица 5.1 – Параметры кода Рида-Соломона для различных сигнально-кодовых конструкций

Вид	Общая	Длина входной	Длина выходной	Параметр
-----	-------	---------------	----------------	----------

модуляции	скорость кодирования	последовательности, бит	(кодированной) последовательности, бит	ы кода Рида-Соломона, (n, k, d)
BPSK	1/2	12	24	(12,12,0)
QPSK	1/2	24	48	(32,24,4)
QPSK	3/4	36	48	(40,36,2)
16-QAM	1/2	48	96	(64,48,8)
16-QAM	3/4	72	96	(80,70,4)
64-QAM	2/3	96	144	(108,96,6)
64-QAM	3/4	108	144	(120,108,6)

Состав блока помехоустойчивого декодирования и демодуляции («Demodulator & FEC Bank»)

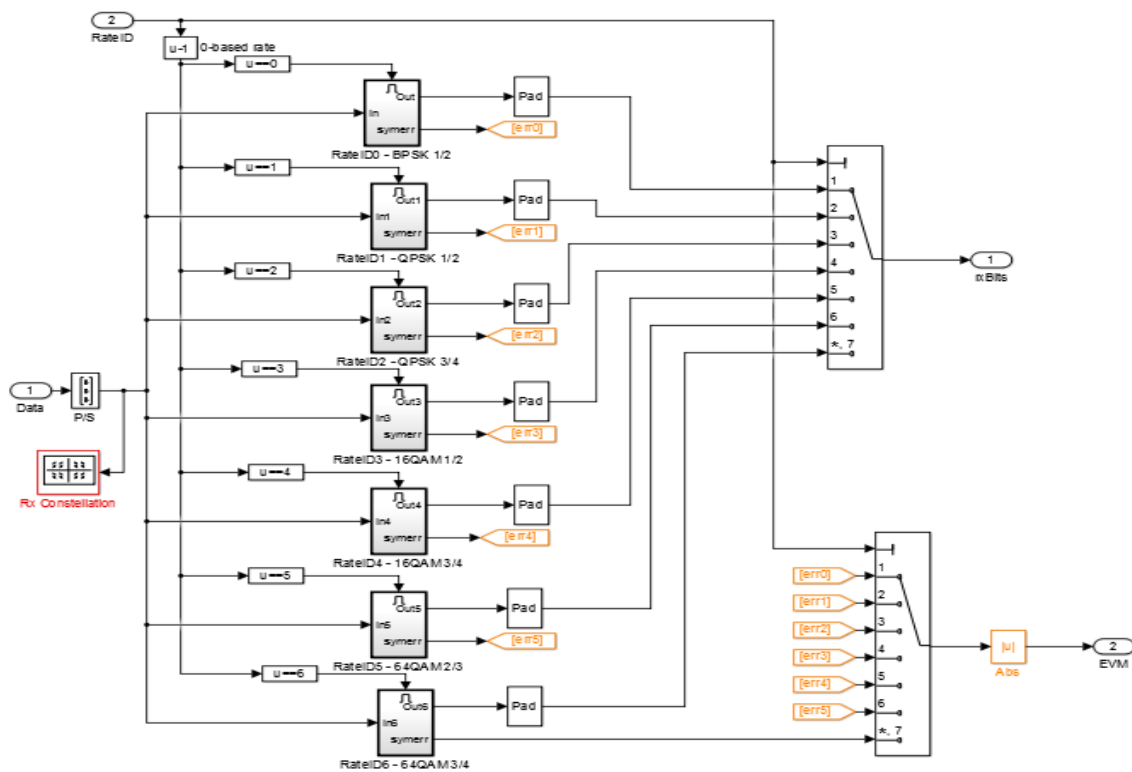


Рис. 5.27. Состав блока декодирования и демодуляции («Demodulator & FEC Bank»)

Состав блока BPSK 1/2 демодулятора

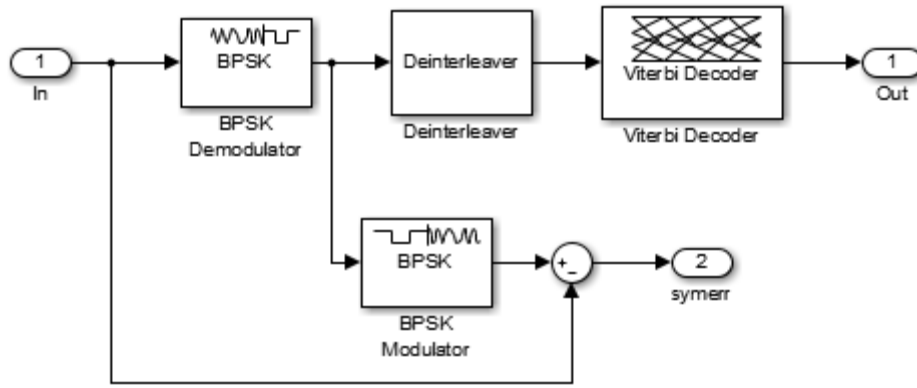


Рис. 5.28. Состав блока демодулятора «BPSK»

Состав блока QPSK 1/2 демодулятора

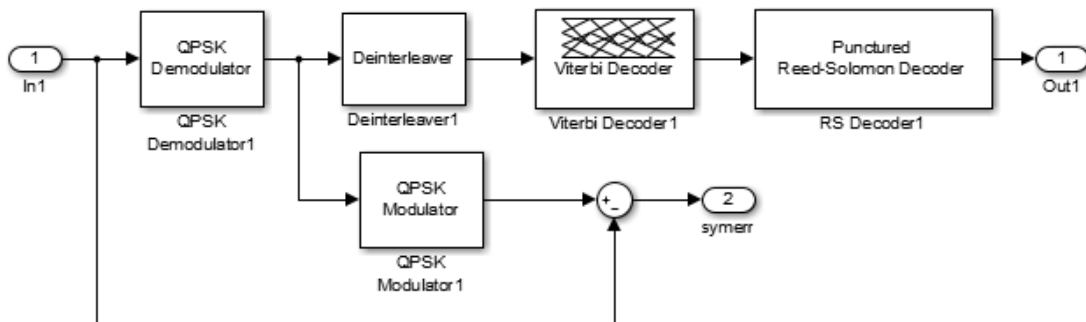


Рис 5.29 – Состав блока демодулятора «QPSK 1/2»

Состав блока QPSK 3/4 демодулятора

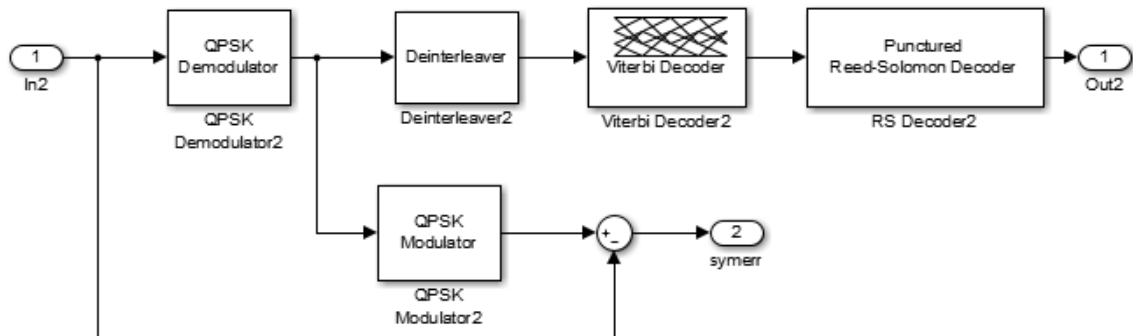


Рис. 5.30. Состав блока демодулятора «QPSK 3/4»

Состав блока 16QAM 1/2 демодулятора

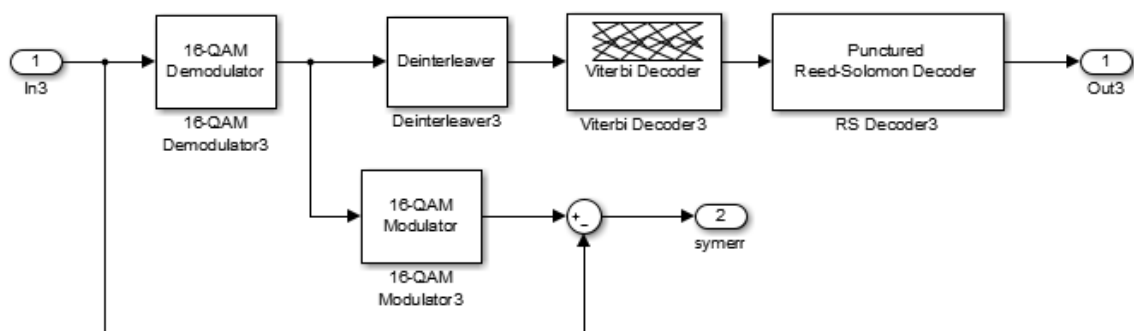


Рис. 5.31. Состав блока демодулятора «16QAM 1/2»

Состав блока 16QAM 3/4 демодулятора

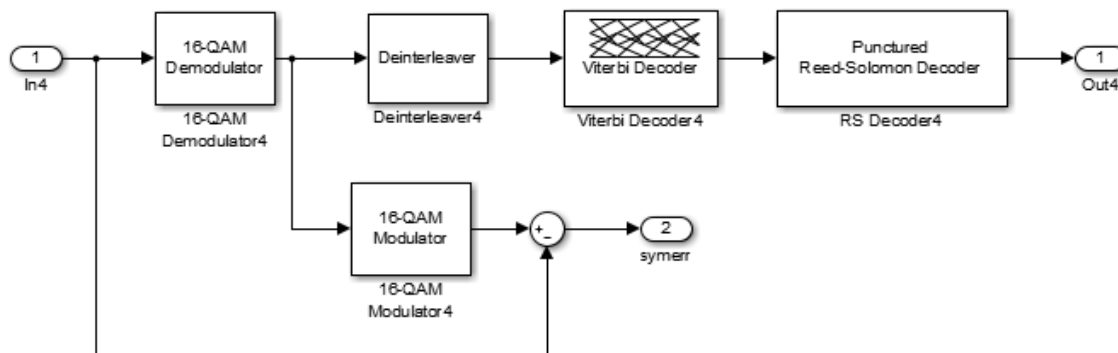


Рис. 5.32. Состав блока демодулятора «16QAM 3/4»

Состав блока 64QAM 2/3 демодулятора

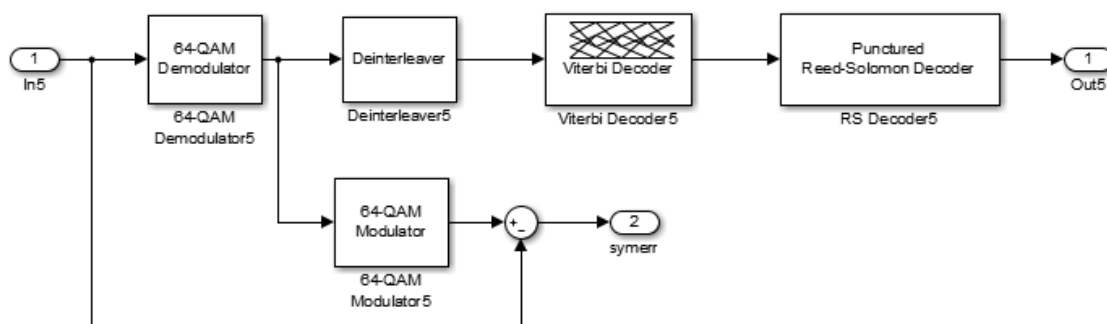


Рис. 5.33. Состав блока демодулятора «64QAM 2/3»

Состав блока 64QAM 3/4 демодулятора

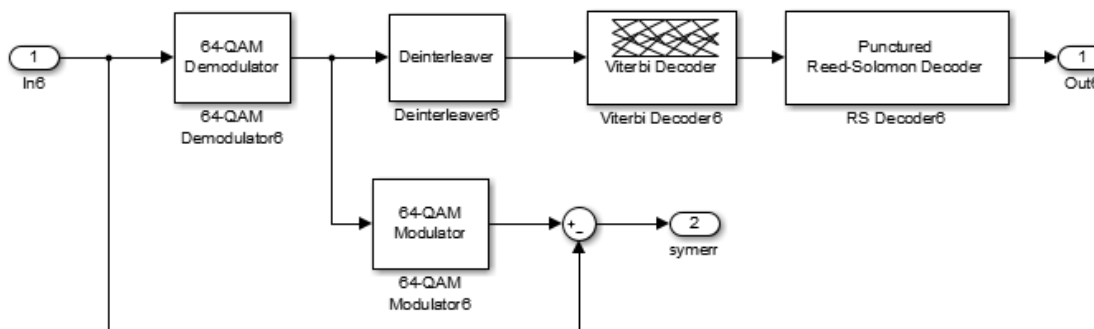


Рис. 5.34. Состав блока демодулятора «64QAM 3/4»

В процессе демодуляции и декодирования, описанные выше процессы, производятся в обратном порядке: демодуляция, депережевание, декодирование сверточного кода по алгоритму Витерби, декодирования циклического блочного кода Рида-Соломона.

В каждом из блоков используется одинаковая последовательность блоков, отличающихся своими параметрами. Например для блока «16QAM 1/2» блоки имеют параметры.

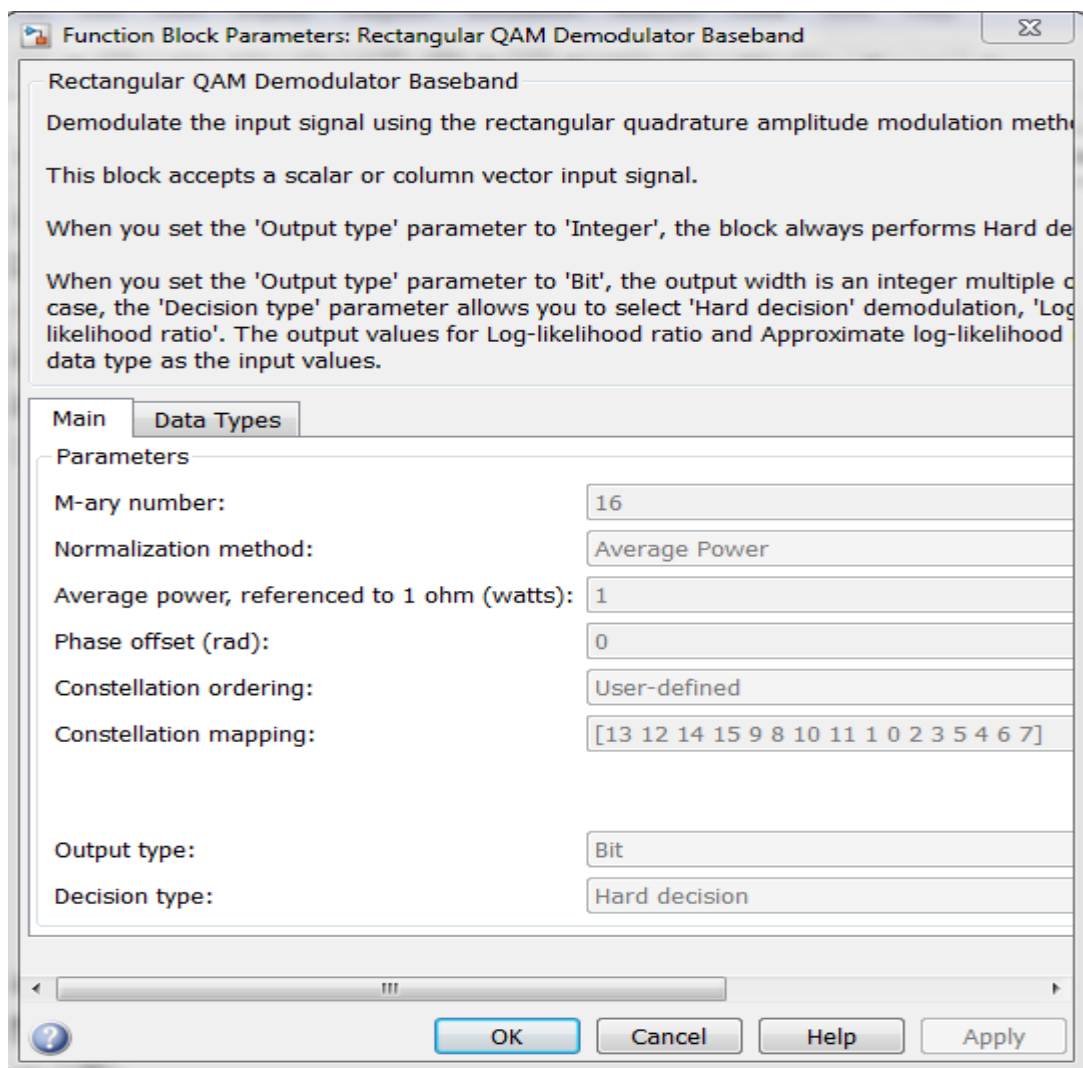


Рис. 5.35. Состав блока демодулятора «16-QAM Modulator 16QAM 1/2»

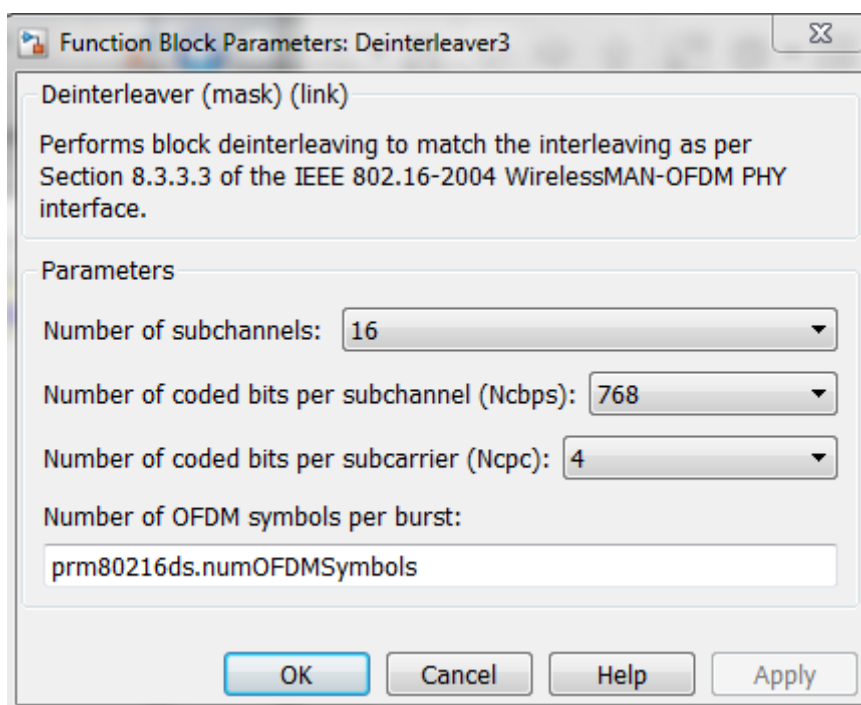


Рис. 5.36. Состав блока деперемежителя « Deinterleaver 16QAM 1/2»

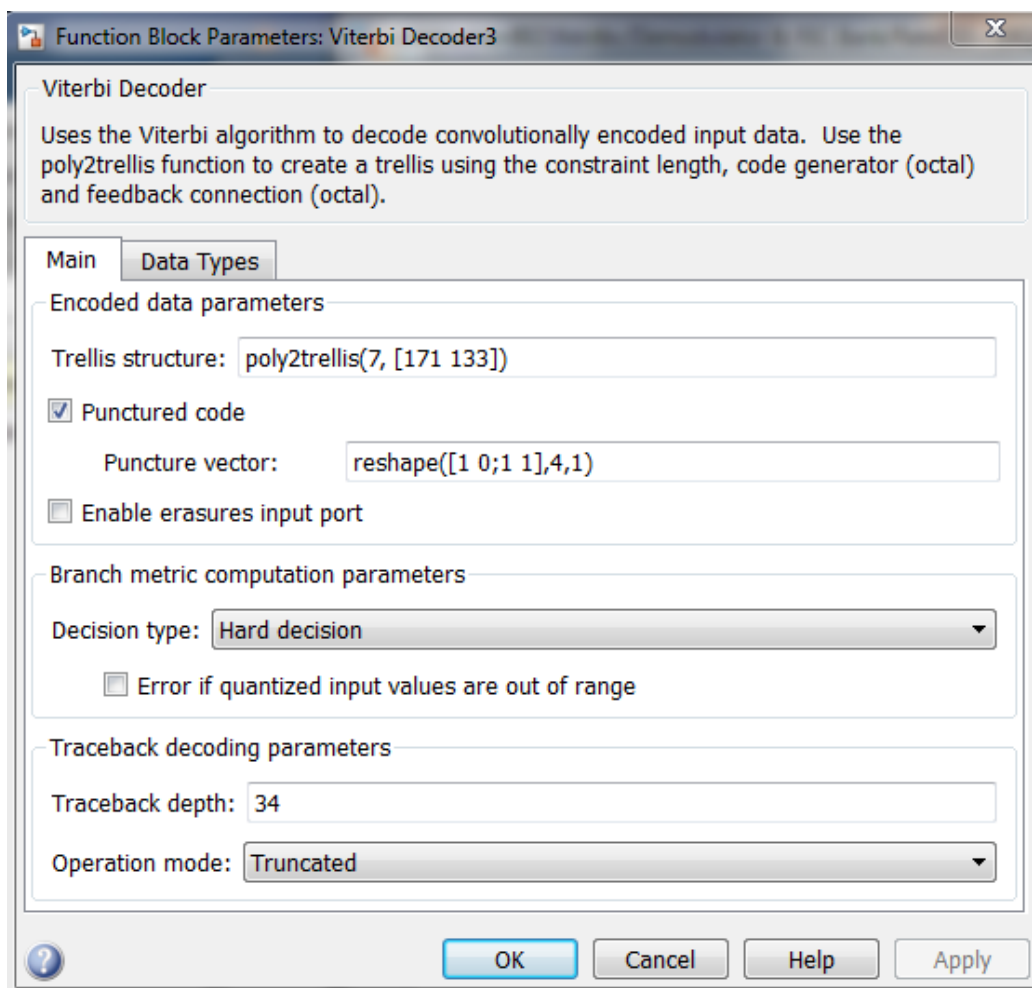


Рис. 5.37. Состав блока декодера Витерби «Viterbi Decoder 16QAM 1/2»

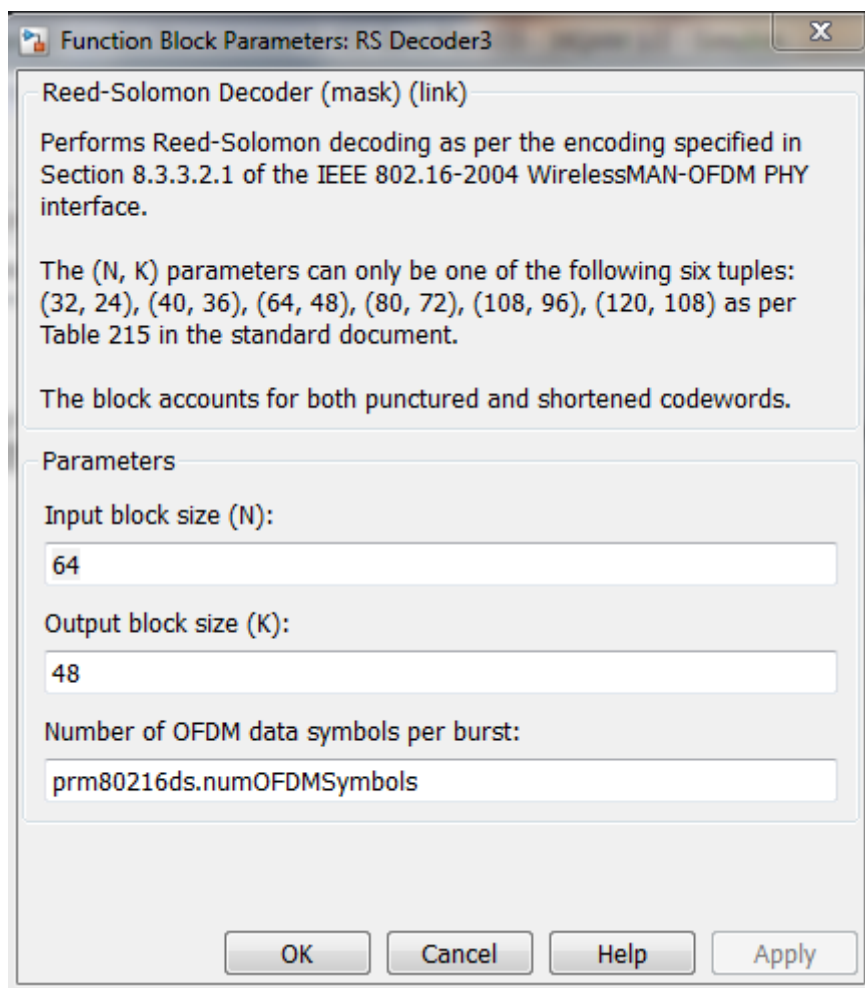


Рис. 5.38. Состав блока декодера Рида-Соломона «RS Decoder 16QAM 1/2»

В каждый момент времени, используемый вид модуляции и скорость кодирования (R) адаптируются под условия передачи. Блок «Adaptive Rate Control» анализирует уровень SNR в приемном устройстве и устанавливает параметры в соответствии с таблицей 5.2:

Таблица 5.2 – Изменение параметров модуляции и кодирования в зависимости от SNR

Вид модуляции и скорость кодирования	Отношение сигнал/шум в приемнике
BPSK	SNR < 4 дБ
QPSK, R=1/2	4 дБ < SNR < 10 дБ
QPSK, R=3/4	10 дБ < SNR < 12 дБ
16-QAM, R=1/2	12 дБ < SNR < 19 дБ
16-QAM, R=3/4	19 дБ < SNR < 22 дБ



64-QAM, R=1/2	22 дБ < SNR < 28 дБ
64-QAM, R=3/4	SNR > 28 дБ

Параметры OFDM-модулятора (блок «OFDM Modulator», рисунок 5.39).

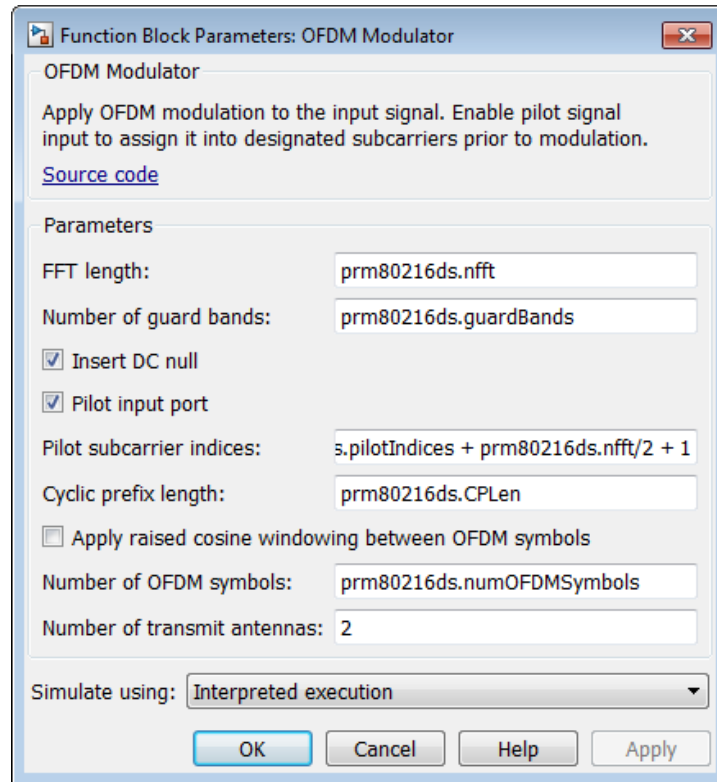


Рис. 5.40. Параметры системы, изменяемые в блоке «OFDM Modulator»

Параметры OFDM-демодулятора (блок «OFDM Demodulator», рисунок 5.41).

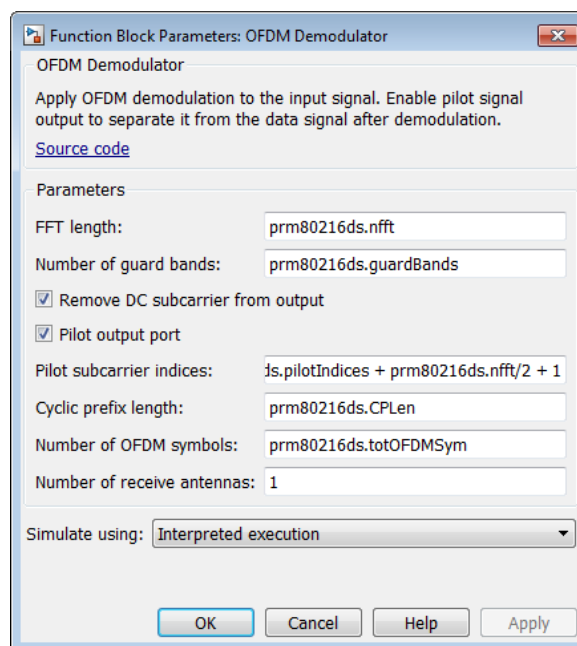


Рис. 5.42 – Параметры системы, изменяемые в блоке «OFDM Demodulator»

Параметры канала MIMO (блок «MIMO Channel», рисунок 5.43).

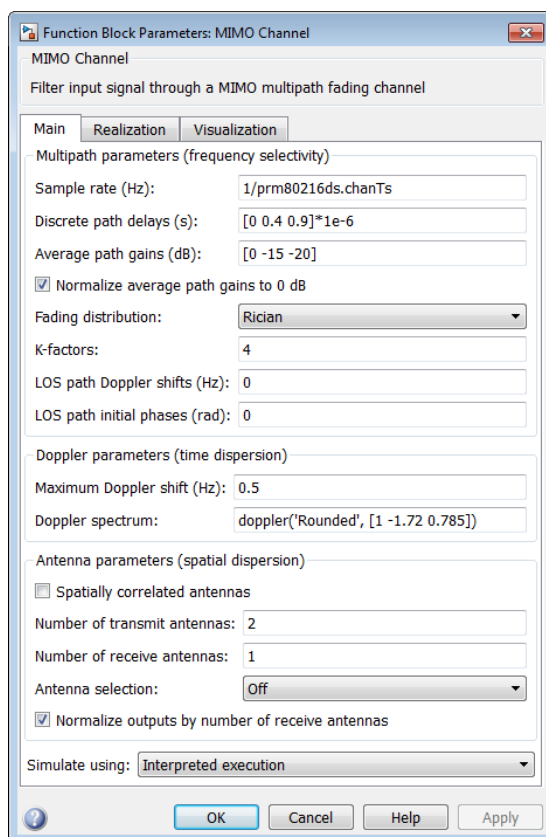


Рис. 5.44. Параметры системы, изменяемые в блоке «MIMO Channel»  
 Параметры канала AWGN (блок «AWGN Channel», рисунок 5.42).

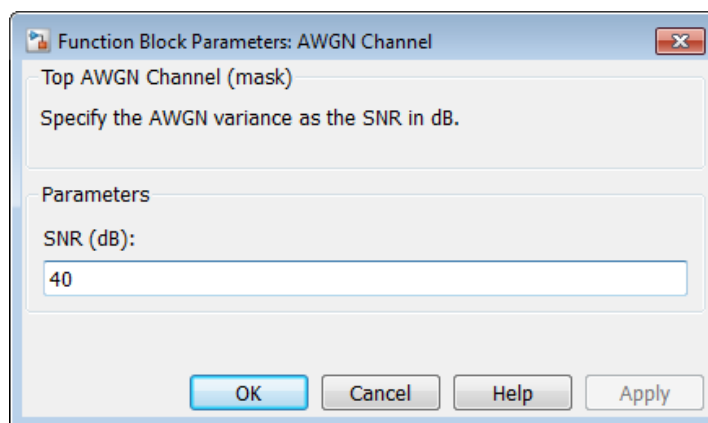


Рис. 5.46. Параметры системы, изменяемые в блоке «AWGN Channel»

### Результаты работы и их анализ

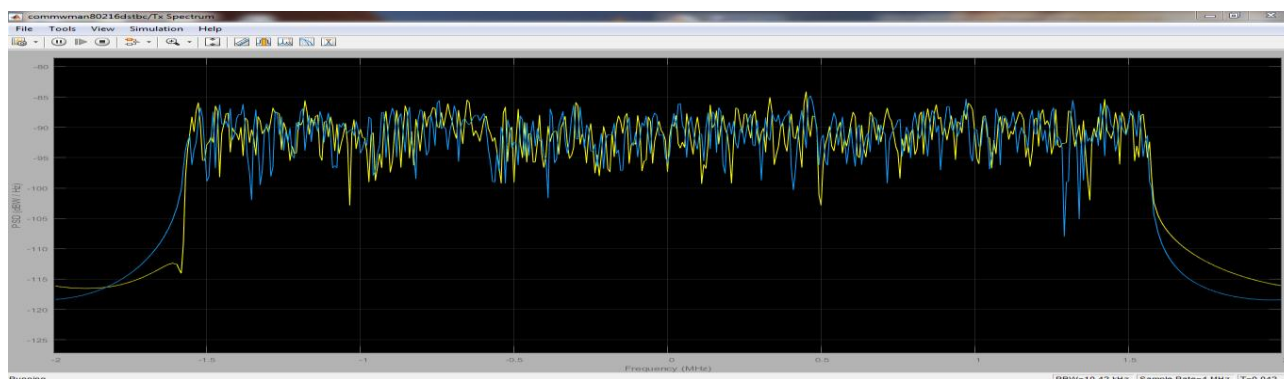


Рис. 5.47. Спектр передаваемых сигналов, поступающих на соответствующую  
 передающую антенну

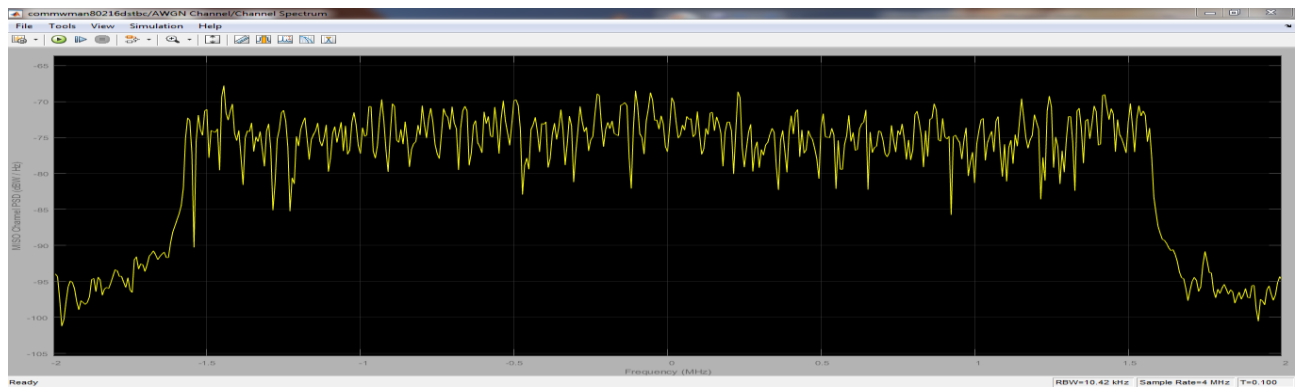


Рис. 5.48. Спектр принимаемого сигнала

Как было описано ранее, система адаптируется к условиям передачи, изменяя вид сигнально-кодовой конструкции сигнала (таблица 5.2). Необходимо исследовать поведение системы в зависимости от SNR в канале передачи (блок AWGN Channel), оформить полученные значения в виде графиков.

Созвездие принимаемого сигнала (BPSK):

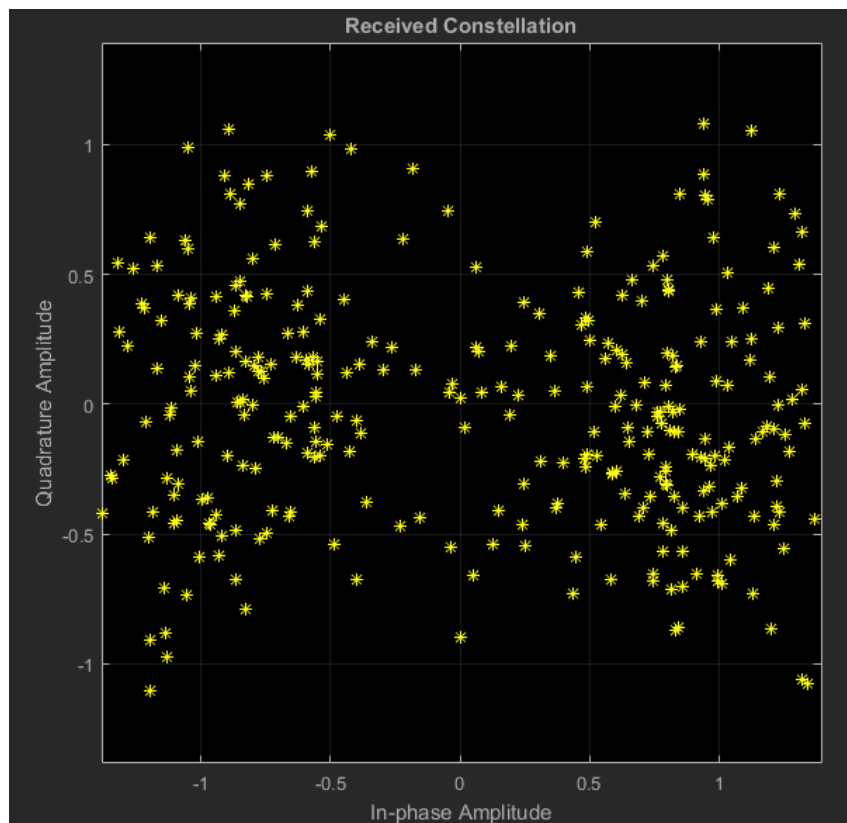


Рис. 5.49. Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 2)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-4):

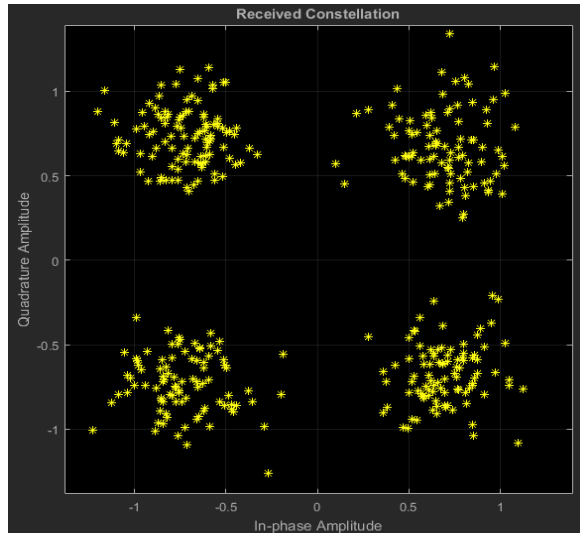


Рис. 5.50. Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 11)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-16):

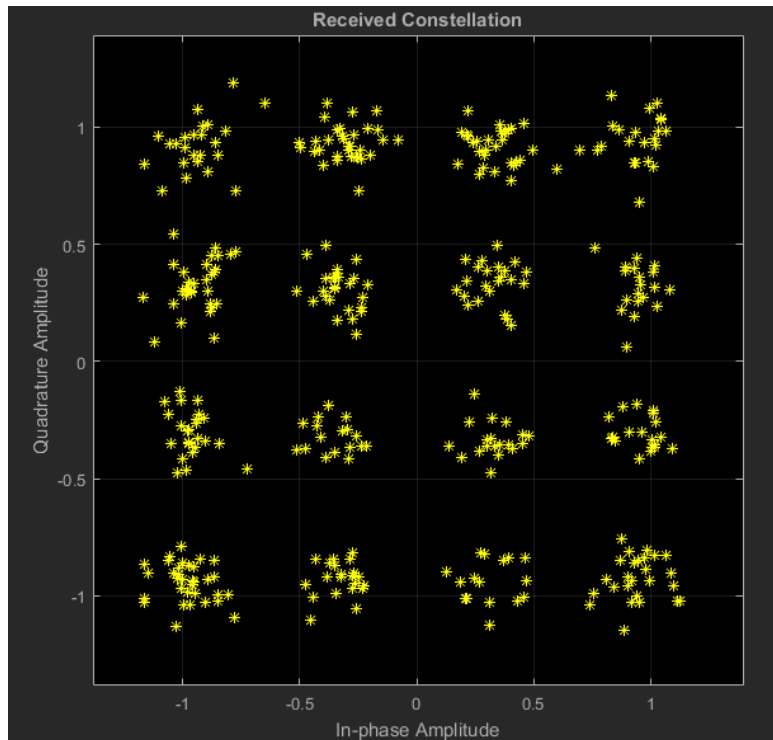


Рис. 5.51.– Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 18)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-64):

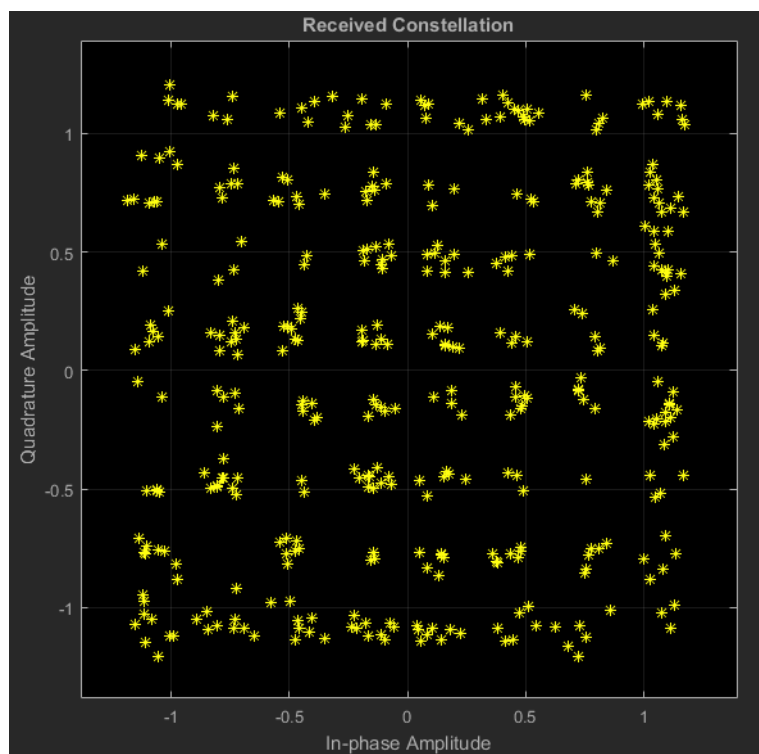


Рис. 5.52. Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 22)

По данным блока «Bit Error Rate Display» можно построить график зависимости битовой вероятности ошибки (BER) от отношения сигнал/шум в канале (рисунок 5.53).

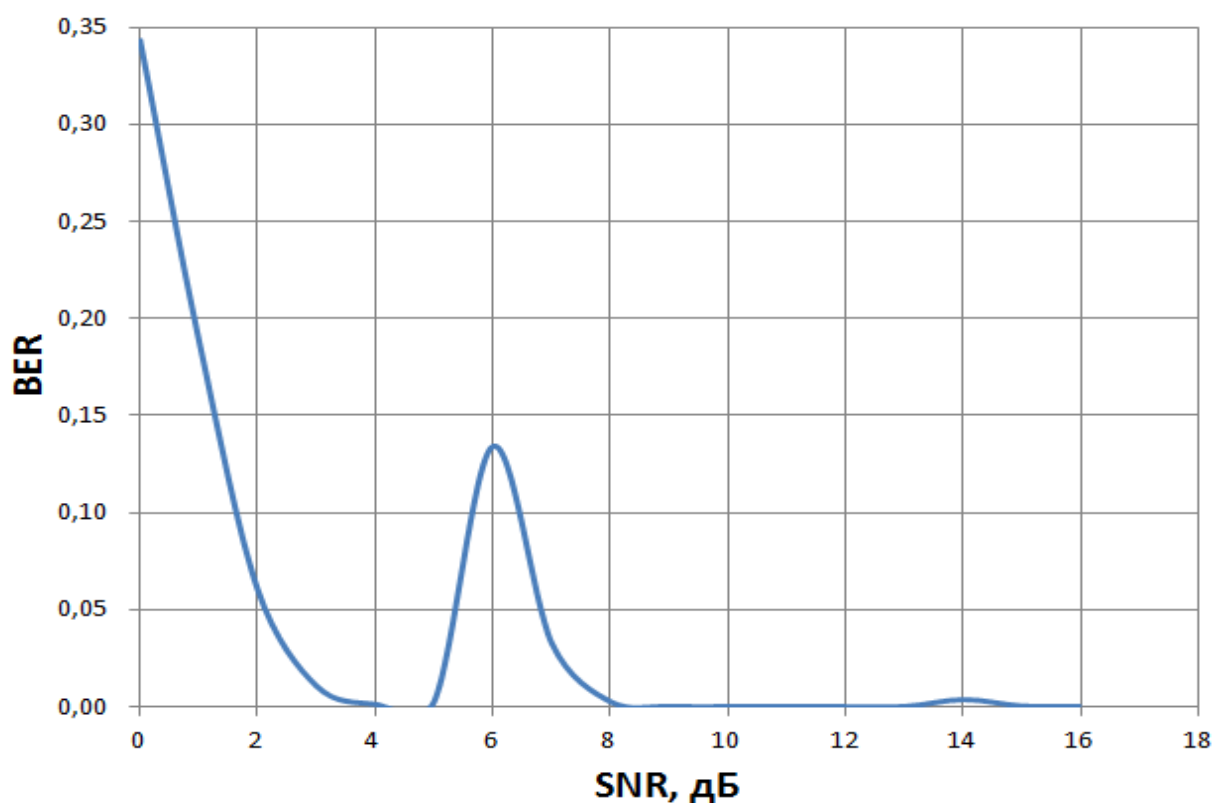


Рис. 5.53. Зависимость BER от SNR при использовании адаптивного изменения параметров

Зависимости BER от SNR для каждого конкретного вида модуляции и скорости кодирования представлены на рисунке 5.39

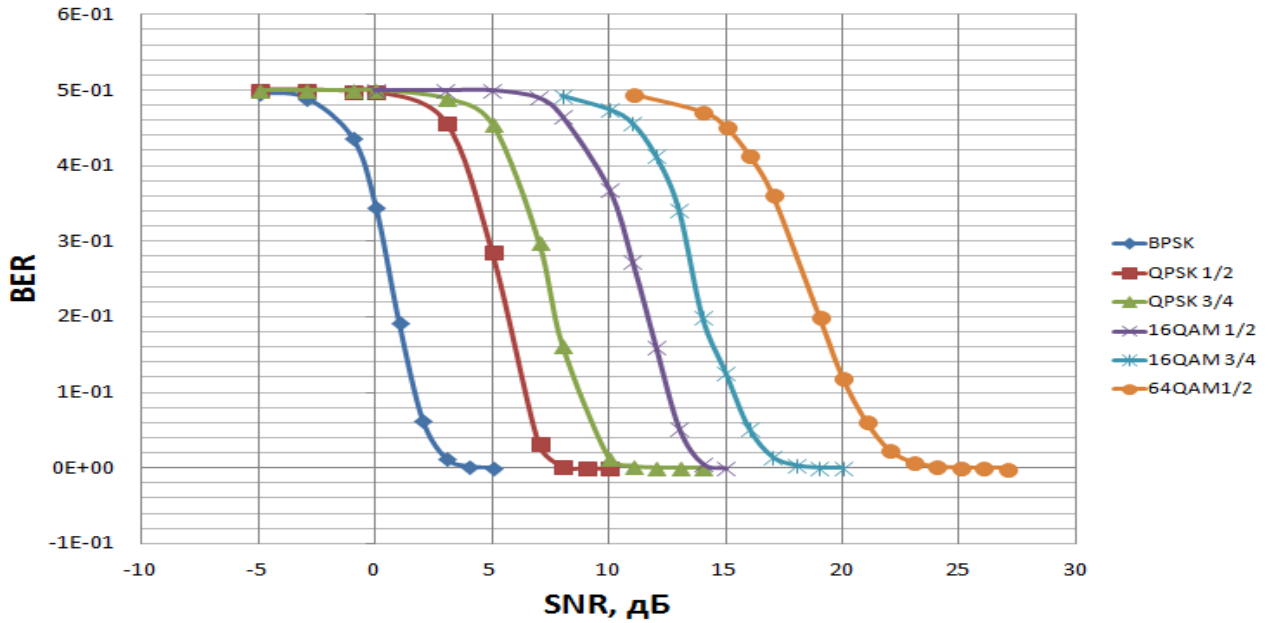


Рис. 5.54. Графики зависимости BER от SNR для отдельных видов модуляции и скорости кодирования.

Та же зависимость в логарифмическом масштабе:

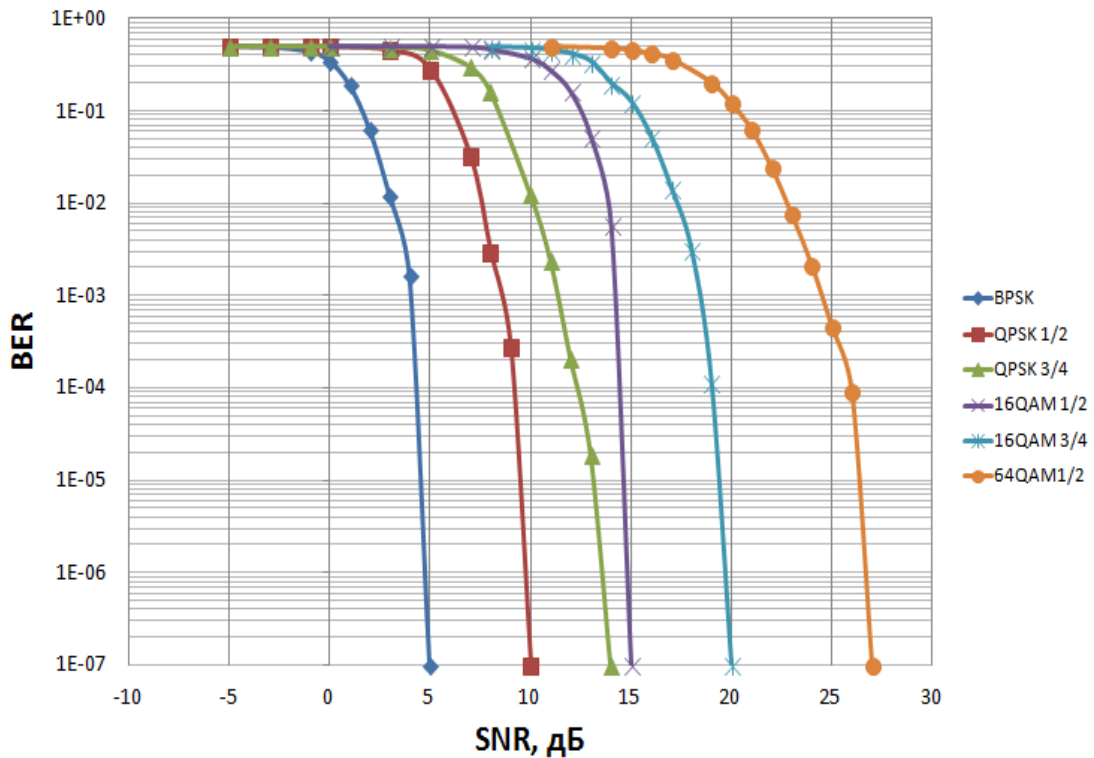


Рис. 5.55 – Графики зависимости BER от SNR для отдельных видов модуляции и скорости кодирования. Логарифмическая шкала

Переход с одного вида модуляции на другой требует большей энергетике сигнала, но взамен происходит значительное увеличение скорости передачи. На рисунке 5.56 представлена зависимость принятого количества бит за 1 секунду (скорость передачи в Мбит/с) от SNR в канале.

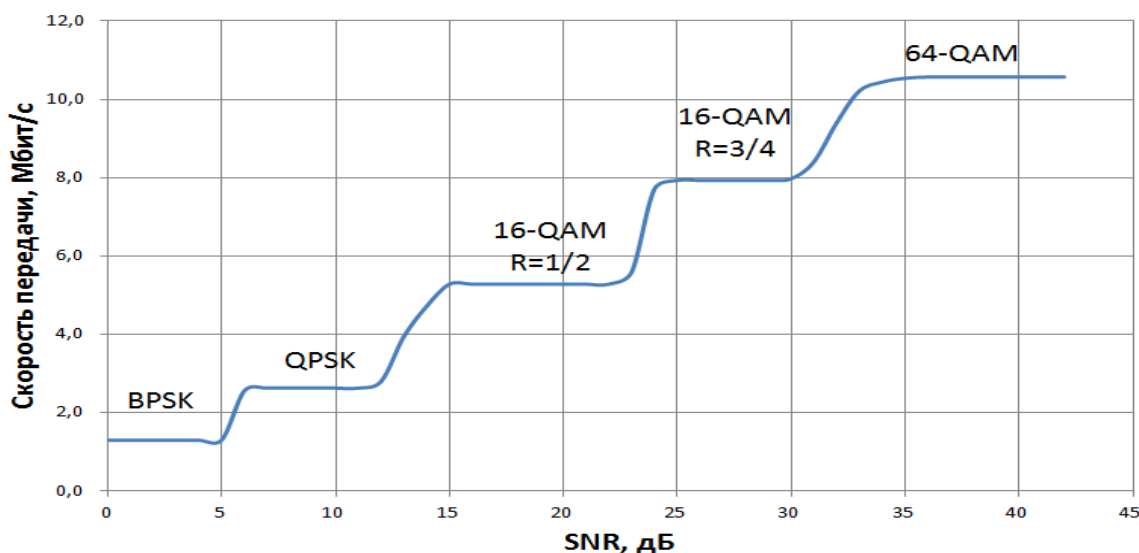


Рис. 5.57. График зависимости скорости передачи от SNR

После демодуляции и декодирования производится оценка SNR для принятых данных (блок «SNR Estimation»). Зависимость оцененного SNR от SNR в канале передачи приведена на рисунке 5.58

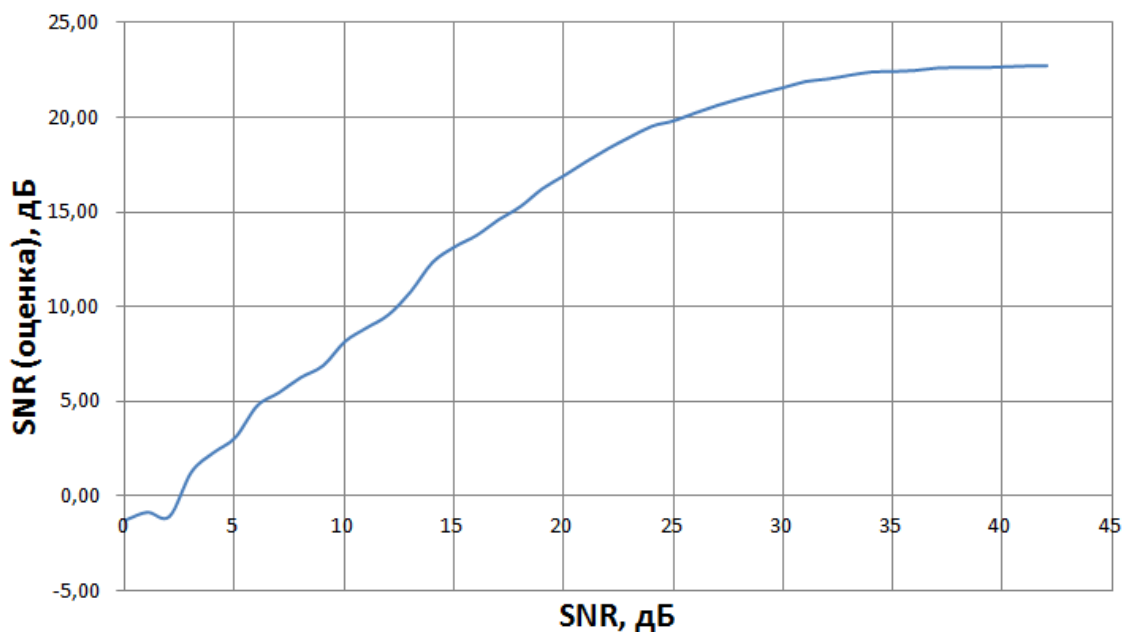


Рис. 5.58. График зависимости оценки SNR от SNR в канале передачи

В результате проделанной работы были получены теоретические знания об основах построения беспроводных сетей WiMAX на основе протокола IEEE 802.16-2004. Изучены сетевой, канальный и физический уровни данного протокола.

По результатам практического исследования модели физического уровня IEEE 802.16-2004 были сделаны следующие выводы:

1. Сравнивая рисунки 3.38 и 3.39 видно, что адаптивное изменение параметров системы в зависимости от SNR в канале приводит к уменьшению вероятности ошибок.

Выбросы значений BER при SNR = 6 и 14 дБ происходят из-за перехода на менее помехозащищенные, но более скоростные виды модуляции.

2. Одновременно с этим происходит увеличение скорости передачи (рисунок 3.41). Скорость передачи изменяется от 1.25 Мбит/с при использовании BPSK до 11 Мбит/с при использовании 64-QAM.

3. По графику зависимости оценки SNR от реального SNR (рисунок 3.42), можно сделать вывод, что система работает наиболее стабильно (зависимость линейна) на участке 5...24 дБ. При SNR > 24 дБ более точная оценка канала не требуется (выбирается наименее помехоустойчивый метод модуляции – QAM-64 (в рамках стандарта)). При SNR < 6 дБ выбирается наиболее помехоустойчивый метод модуляции – BPSK.

### **5.7. Проектирование защищенной системы мобильной связи стандарта IEEE 802. 20 (LTE) на базе ПО MATLAB**

Целью раздела является приобретение и закрепление навыков организации и реализации в программной среде системы мобильной связи стандарта LTE, подробное изучение схем входящих в состав стандарта и программного обеспечения с которыми предстоит работать при выполнении курсового проекта, умения выбрать необходимые решения на основе требований технического задания.

Помимо теоритической части, задачей курсового проектирования является построение в программной среде схемы передачи информации от базовой станции (БС) к мобильной станции (МС) и ее анализ. Схема будет включать в свой состав: генератор бинарной последовательности, кодек, модулятор/демодулятор, канал связи, анализатор ошибок и т.д.

Основным отличием стандарта LTE от предыдущих стандартов сетей связи является применение «плоской» более упрощённой IP-архитектуры, которая способствует уменьшению задержек при установленной Интернет-сессии. В стандарте LTE использовано два принципиально новых метода увеличения пропускной способности. Первый заключается в применении технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output), где передача и приём сигнала осуществляется одновременно через несколько передающих и приёмных антенн. Таким образом, повышается скорость передачи данных в беспроводных сетях. Второй метод заключается в применении OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) модуляции, использующей несколько поднесущих. Преимущество данного метода заключается также в том, что системы связи с LTE могут работать в отсутствии прямой видимости.



## Стандарты 2G и 3G

### Стандарт 2G (GSM)

Разработка стандарта GSM началась еще в 1982 году организацией по стандартизации CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations). В 1991 году в Финляндии была введена в эксплуатацию первая в мире сеть GSM. Уже к концу 1993 года число абонентов, использующих этот стандарт, перевалило за миллион. К этому времени сети GSM были развернуты в 73 странах мира.

Сети стандарта GSM позволяют предоставлять широкий перечень услуг:

- Голосовые соединения
- Услуги передачи данных (до 384 кбит/сек благодаря технологии EDGE (дополнение технологии GPRS, в результате появилась передача данных с пакетной коммутацией, т.е. пакетный трафик отделяется от голосового))
- Передача коротких текстовых сообщений (SMS)
- Передача факсов
- Голосовая почта
- Конференцсвязь и мн. др.

Итак, рассмотрим основные элементы, входящие в состав системы GSM:

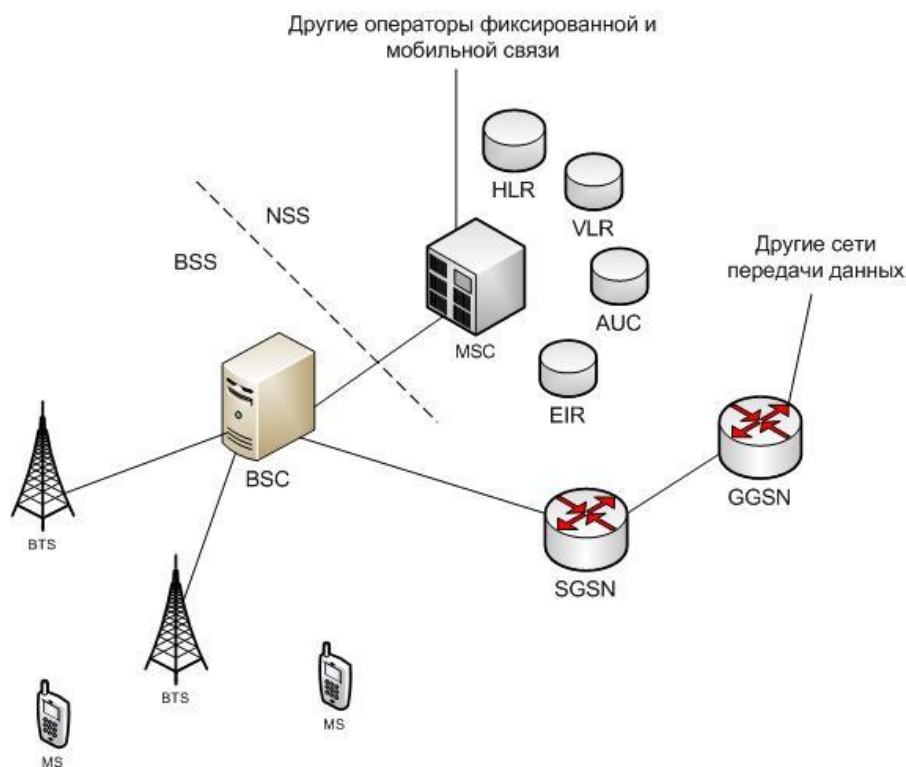


Рис. 5.94. Структура сети стандарта 2G (GSM)

Сеть GSM делится на 2 системы. Каждая из этих систем включает в себя ряд функциональных устройств, которые, в свою очередь являются компонентами сети мобильной радиосвязи.

Данными системами являются:

- Система коммутации – Network Switching System (NSS).
- Система базовых станций - Base Station System (BSS).

Система NSS выполняет функции обслуживания вызовов и установления соединений, а также отвечает за реализацию всех назначенных абоненту услуг. NSS включает в себя следующие функциональные устройства:

- Центр коммутации мобильной связи (MSC).
- Домашний регистр местоположения (HLR).
- Визитный регистр местоположения (VLR).
- Центр аутентификации (AUC).
- Регистр идентификация абонентского оборудования (EIR).

Система BSS отвечает за все функции, относящиеся к радиоинтерфейсу. Эта система включает в себя следующие функциональные блоки:

- Контроллер базовых станций (BSC).
- Базовую станцию (BTS).

MS (т.е. телефон абонента (мобильная станция)) не принадлежит ни к одной из этих систем, но рассматривается как элемент сети.

Элементы сети, относящиеся к пакетной передаче данных:

- SGSN – узел обслуживания абонентов.
- GGSN – шлюзовой узел.

### **Стандарт 3G (UMTS)[2]**

Разработка стандарта UMTS началась в 1992 году организацией по стандартизации ИМТ-2000. Впоследствии разработка этого стандарта была поручена [3GPP](#). Первая сеть UMTS была запущена в коммерческую эксплуатацию 1 декабря 2001 года в Норвегии. К маю 2010 года число абонентов переваливает за 540 миллионов по всему миру.

Скорость передачи данных для сетей UMTS может достигать 2Мбит/сек. Благодаря технологии [HSDPA](#)-High Speed Downlink Packet Access (3.5G), которая была внедрена в 2006 году максимальная скорость возросла до 14 Мбит/сек. Эти и другие преимущества UMTS позволяют предоставлять абонентам широкий перечень услуг: [ВИДЕОЗВОНКИ](#), [ВИДЕОКОНФЕРЕНЦИИ](#), высококачественные голосовые звонки, загрузка файлов с высокой скоростью, сетевые игры, мобильная коммерция и мн. др.

Рассмотрим структуру системы UMTS и ее основные отличия от стандарта второго поколения [GSM](#).

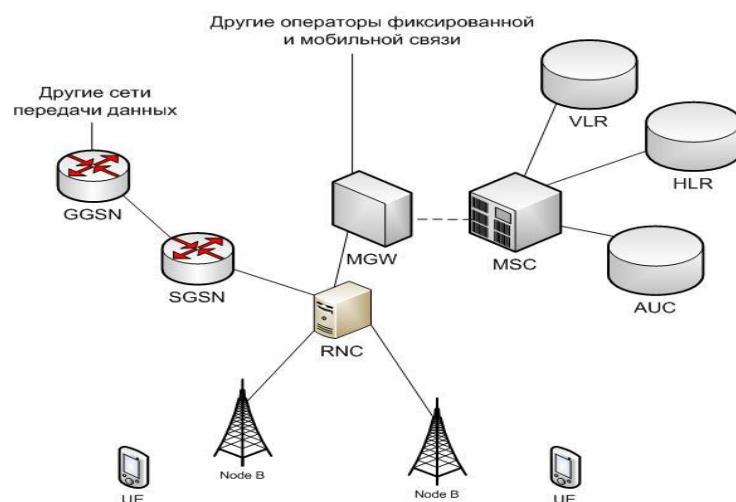


Рис. 5.95. Структура сети стандарта 3G (UMTS)

**Подсистема коммутации:**

В первых релизах стандарта UMTS (R99, R4) подсистема коммутации не отличалась по своей структуре от той же подсистемы сетей второго поколения. В нее входили MSC – Mobile Switching Centre, который выполнял функции коммутации, установления соединения, тарификации и др., а также ряд регистров HLR, VLR, AUC, которые предназначены для хранения абонентских данных. В более поздних релизах (R5, R6, R7, R8) функции MSC были разделены между двумя устройствами: MSC-Server и MGW (Media gateway). MSC-Server отвечает за установление соединений, тарификацию, выполняет некоторые функции аутентификации. MGW представляет собой коммутационное поле, подчиненное MSC-Server.

**Подсистема базовых станций:**

В сети UMTS по сравнению с сетью GSM наибольшие изменения претерпела подсистема базовых станций. Отмеченные выше преимущества достигаются в первую очередь за счет новой технологии передачи информации между базовой станцией и телефоном абонента.

Итак, рассмотрим основные элементы, входящие в подсистему базовых станций:

RNC (Radio Network Controller) – контроллер сети радиодоступа системы UMTS. Он является центральным элементом подсистемы базовых станций и выполняет большую часть функций: контроль радиоресурсов, шифрование, установление соединений через подсистему базовых станций, распределение ресурсов между абонентами и др. В сети UMTS контроллер выполняет гораздо больше функций, нежели в системах сотовой связи второго поколения.

NodeB – базовая станция системы сотовой связи стандарта UMTS. Основной функцией NodeB является преобразование сигнала, полученного от RNC в широкополосный радиосигнал, передаваемый к телефону. Базовая станция не принимает решений о выделении ресурсов, об изменении скорости к абоненту, а лишь

служит мостом между контроллером и оборудованием абонента, и она полностью подчинена RNC.

Оборудование абонента получило название UE (User Equipment (мобильная станция)). Тем самым подчеркивается, что в отличие от предшествующих стандартов в UMTS может быть не только обычный телефон, но и смартфон, ноутбук, стационарный компьютер и т.п.

Пакетные данные в сети UMTS передаются от MGW к известному нам по системе GSM элементу SGSN (узел обслуживания абонентов), после чего через GGSN (шлюзовой узел) поступают к другим внешним сетям передачи данных, например Internet. Как правило, SGSN и GGSN сети GSM применяются для тех же целей и в сети UMTS. Производится только коррекция программного обеспечения данных элементов.

### **Стандарт LTE и его отличие от предыдущих стандартов**

Стандарты третьего поколения позволяют предоставить широкий перечень мультимедийных услуг и поддерживают скорости передачи данных до 14Мбит/сек. Это вполне соответствует запросам абонентов в настоящее время. Однако, объемы передаваемой информации в телекоммуникационных сетях растут с каждым днем. Чтобы удовлетворить потребности пользователей по скорости передачи данных и набору услуг, хотя бы на 20 лет вперед необходим новый стандарт, уже четвертого поколения.

Работа над первым стандартом четвертого поколения - LTE (Long Term Evolution) началась в 2004 году организацией 3GPP. Главными требованиями, которые предъявлялись в процессе работы над стандартом были следующие:

- Скорость передачи данных выше 100 Мбит/сек.
- Высокий уровень безопасности системы.
- Высокая энергоэффективность.
- Низкие задержки в работе системы.
- Совместимость со стандартами второго и третьего поколений.

В конце 2009 года в Швеции была запущена в коммерческую эксплуатацию первая сеть стандарта LTE.

Сети LTE поддерживают скорости передачи данных до 326,4 Мбит/сек. К примеру, загрузка фильма в хорошем качестве займет менее одной минуты. Таким образом, верхняя планка по скорости передачи данных практически снимается.

Рассмотрим структуру сети LTE:

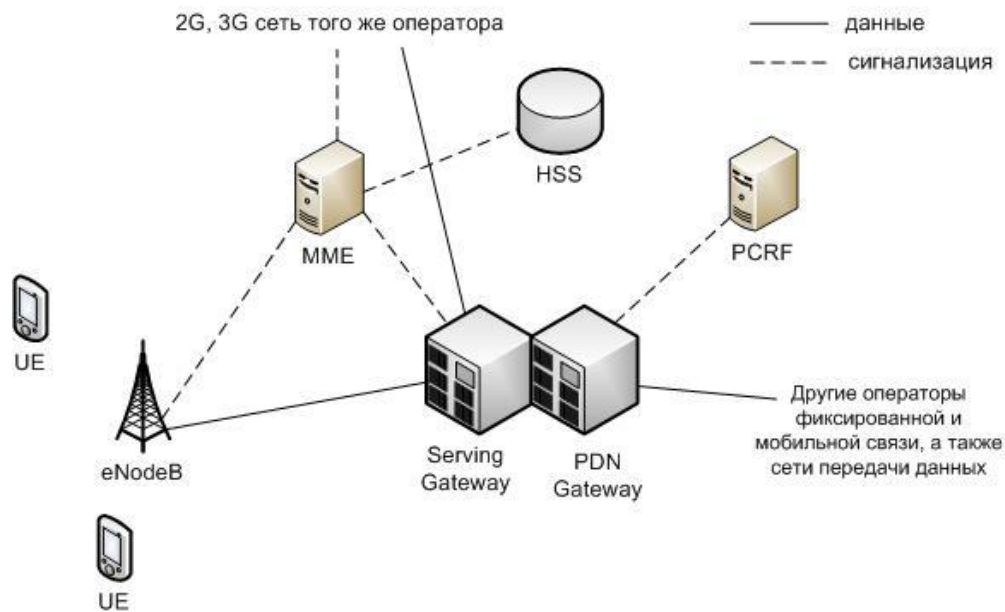


Рис. 5.96. Структура сети стандарта LTE

Из схемы сети LTE, представленной выше, уже видно, что структура сети сильно отличается от сетей стандартов 2G и 3G. Существенные изменения претерпела и подсистема базовых станций, и подсистема коммутации. Была изменена технология передачи данных между оборудованием пользователя и базовой станцией. Также подверглись изменению и протоколы передачи данных между сетевыми элементами. Вся информация (голос, данные) передается в виде пакетов. Таким образом, уже нет разделения на части обрабатывающие либо только голосовую информацию, либо только пакетные данные.

Можно выделить следующие основные элементы сети стандарта LTE:

**Serving SAE Gateway или просто Serving Gateway (SGW)** – обслуживающий шлюз сети LTE. Предназначен для обработки и маршрутизации пакетных данных поступающих из/в подсистему базовых станций. По сути, заменяет MSC (выполняет функции коммутации, установления соединения, тарификации), MGW (представляет собой коммутационное поле) и SGSN (узел обслуживания абонентов пакетной сети передачи данных) сети UMTS (3G). SGW имеет прямое соединение с сетями второго и третьего поколений того же оператора, что упрощает передачу соединения в/из них по причинам ухудшения зоны покрытия, перегрузок и т.п.

**Public Data Network (PDN) SAE Gateway или просто PDN Gateway (PGW)** – шлюз к/от сетей других операторов. Если информация (голос, данные) передаются из/в сети данного оператора, то они маршрутизируются именно через PGW.

**Mobility Management Entity (MME)** – узел управления мобильностью. Предназначен для управления мобильностью абонентов сети LTE.

**Home Subscriber Server (HSS)** – сервер абонентских данных. HSS представляет собой объединение VLR (гостевой регистр местоположения), HLR (домашний регистр

местоположения), AUC (центр аутентификации абонентов) выполненных в одном устройстве.

**Policy and Charging Rules Function (PCRF)** – узел выставления счетов абонентам за оказанные услуги связи.

Все перечисленные выше элементы относятся к системе коммутации сети LTE. В системе базовых станций остался лишь один знакомый нам элемент – базовая станция, которая получила название **eNodeB**. Этот элемент выполняет функции и базовой станции, и контроллера базовых станций сети LTE. За счет этого упрощается расширение сети, т.к. не требуется расширение емкости контроллеров или добавления новых. Мобильная станция представлена – **UE**.

### Интерфейсы между узловыми элементами в сетях стандарта LTE

Структура сети стандарта LTE претерпела значительные изменения по сравнению с сетями предыдущих поколений. Это повлияло также и на изменение интерфейсов между узлами сети. На рисунке ниже представлена общая модель сети стандарта LTE и ее основные интерфейсы.

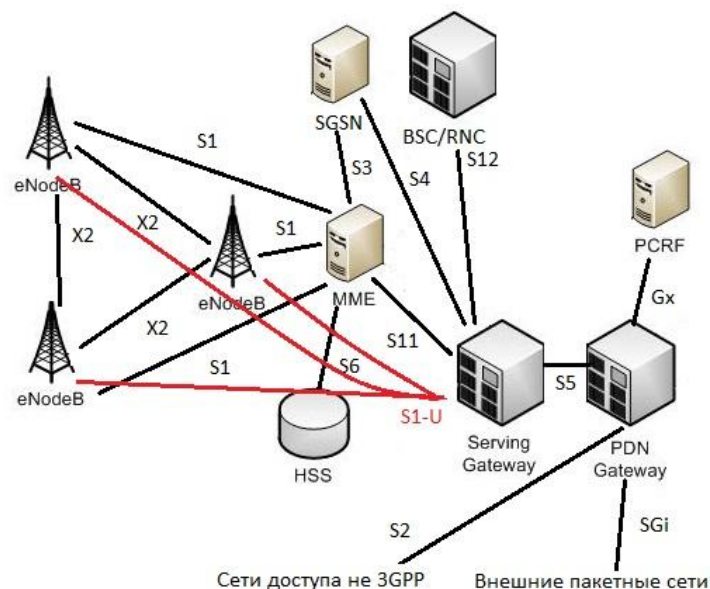


Рис. 5.97. Интерфейсы сети стандарта LTE

Рассмотрим основные интерфейсы сети LTE:

- X2 - интерфейс между eNodeB. Базовые станции в сети LTE соединены по принципу «каждый с каждым».
- S1 – интерфейс связывающий подсистему базовых станций E-UTRAN и MME. По данному интерфейсу передаются данные управления.
- S1-U – интерфейс между E-UTRAN и SAE, по которому передаются пользовательские данные.
- S2 – интерфейс для организации соединения между PDN-Gateway и сетями доступа, которые не разрабатывались 3GPP.

- S3 – интерфейс, предоставляющий прямое соединение SGSN и MME. Он служит для передачи данных управления для обеспечения мобильности между LTE и 2G/3G сетями.
- S4 – интерфейс, связывающий SAE и SGSN. Он служит для передачи пользовательских данных для обеспечения мобильности между LTE и 2G/3G сетями.
- S5 – интерфейс между SAE и PDN-Gateway. S5 предназначен для передачи пользовательских данных между SAE и PDN-Gateway.
- S6 – интерфейс между MME и HSS. Он используется для передачи данных абонентского профиля, а также осуществления процедур аутентификации в сети LTE.
- Gx – интерфейс между PDN-Gateway и PCRF. Gx предназначен для передачи правил тарификации от PCRF к PDN-Gateway.
- SGi - интерфейс между PDN-Gateway и внешними IP-сетями.

### Принципы построения радиointерфейса LTE в Downlink (от БС к МС)

Одной из главных отличительных особенностей стандарта LTE, которая позволяет достигать высоких скоростей передачи данных является изменение принципов построения интерфейса от eNodeB (БС) до UE (МС) на линии «вниз». Рассмотрим главные особенности этого интерфейса и постараемся выделить основные качественные отличия, которые отличают этот стандарт от других.

В сетях связи стандарта LTE в Downlink (DL) используется модуляция OFDM – Orthogonal Frequency Devision Multiplexing– ортогональная частотная модуляция. Этот тип модуляции определяет и принцип доступа OFDMA - Orthogonal Frequency Devision Multiple Access – множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов. Суть его заключается в том, что все частотно-временное поле, выделенное для работы оператора, разделяется на небольшие блоки. Причем они небольшие как по частоте (15 кГц), так и по времени (0,5 мс). Сеть распределяет эти блоки между абонентами в зависимости от их потребностей и возможностей сети. Таким образом, обеспечивается максимально эффективное использование ресурсов.

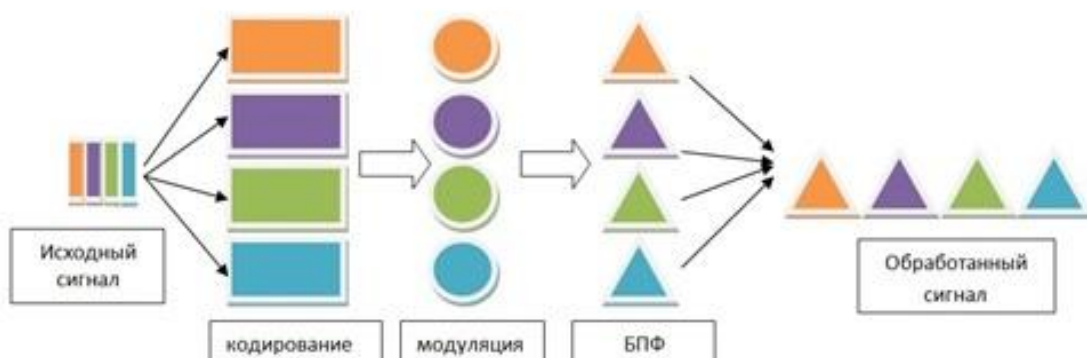




Рис. 5.98. OFDM – модулятор

Ниже перечислены главные шаги преобразования сигнала в OFDM модуляторе.

- 1) Разделение исходного потока бит на параллельные потоки.
- 2) Кодирование помехоустойчивым кодом, в процессе которого значительно увеличивается число символов в отдельных потоках.
- 3) Манипуляция выбранным в данный конкретный момент способом модуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM.
- 4) Перемножение полученной последовательности каждого потока на свою поднесущую. Эта операция является ключевой и будет рассмотрена ниже.
- 5) Объединение сигналов и передача в эфир.

Умножение сигнала на свою поднесущую перемещает сигнал в нужное частотное пространство. Также на этом этапе происходит преобразование сигнала из временной области в частотную. Это выполняется благодаря БПФ – быстрому преобразованию Фурье. Эти две процедуры позволяют добиться максимально близкого размещения сигналов в частотной области и сократить до минимума защитные интервалы. Это достигается благодаря тому, что поднесущие выбираются ортогональными (на практике квазиортогональными), и отдельные потоки относительно легко выделить на приемной стороне.

Кроме использования OFDMA в LTE – есть еще одно важное новшество: обязательное (в отличие от UMTS) использование MIMO - Multiple Input Multiple Output – множественный вход множественный выход. При этом информационный поток направляется между сторонами обмена информации несколькими «путями», что обеспечивает более эффективное использование частотно-временного ресурса.

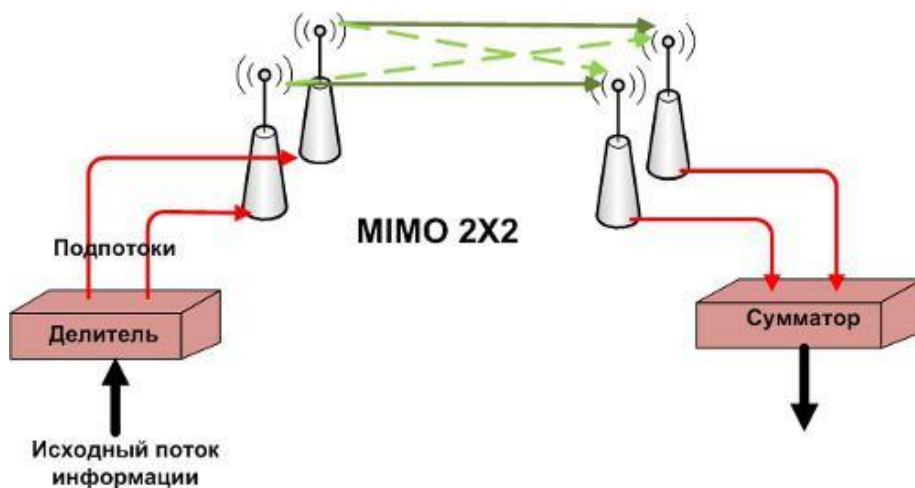


Рис. 5.99. MIMO 2x2

Эти два важных изменения позволяют добиться скорости передачи данных в Downlink свыше 100 Мбит/сек. Задержки передачи данных не превышают 20 мс. Для



сравнения в UMTS скорости передачи данных редко поднимаются выше 20 Мбит/сек, а задержки могут колебаться от 40 до 100 мс.

### Принципы построения радиointерфейса LTE в Uplink (от МС к БС)

В сетях связи стандарта LTE скорость передачи данных в направлении от UE (МС) к eNodeB (БС) может достигать 50 Мбит/сек, а задержки не превышают 10мс. Эти показатели на много превышают значения в сетях третьего поколения и практически сравнялись с проводными выделенными каналами связи. Рассмотрим главные особенности построения радиointерфейса Uplink в стандарте LTE.

В отличие от радиointерфейса Downlink, где информация одного пользователя может передаваться на разных поднесущих, в Uplink данные каждого пользователя передаются в одной полосе частот, причем в одно и то же время. Однако это не означает, что информационные потоки накладываются друг на друга и необратимо искажаются. Это обеспечивается благодаря использованию множественного доступа с частотным разделением с единственной несущей частотой SC-FDMA (Single Carrier Frequency Devision Multiple Access). Рассмотрим основные принципы работы SC-FDMA – модулятора.

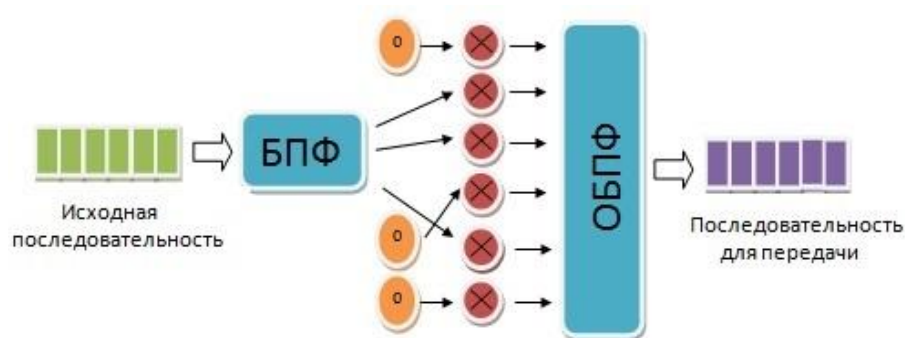


Рис. 5.100. SC-FDMA – модулятор

Первым этапом исходная информационная последовательность, предназначенная для передачи от абонента, преобразуется в частное представление с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Далее, в зависимости от скорости потока от данного абонента, сеть выделяет UE (МС) несколько поднесущих, среди которых распределяются преобразованный поток. Те поднесущие, которые используют другие пользователи не занимают в данном абонентском терминале, а соответствующие поднесущие перемножаются с «0». После обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) модулированные потоки объединяются и переводятся обратно во временную область. Несмотря на то, что данные передаются от разных устройств в сети в одно и то же время в одной и той же полосе частот, на приемной стороне после обратных сказанным выше процедур, можно выделить информационные потоки от отдельных UE (МС).

Благодаря использованию SC-FDMA в системе LTE удалось достигнуть трехкратного увеличения спектральной эффективности на линии «вверх», по сравнению с сетями 3G.

### Логические каналы на радиointерфейсе в LTE

Одной из важнейших составляющих радиointерфейса любой подвижной системы связи, которая обеспечивает заданные характеристики ее работы, является структура логических, транспортных и физических каналов. Рассмотрим логические параметры сети связи LTE.

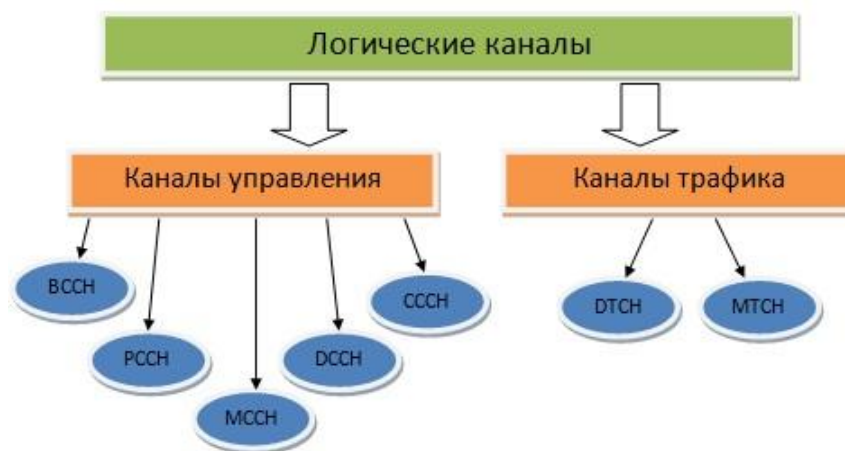


Рис. 5.101. Логические каналы LTE

Логические каналы подразделяются по типам передаваемой информации на каналы управления и на трафиковые каналы.

#### К каналам управления относятся:

□ BCCH (Broadcast Control Channel) – вещательный канал управления – служит для передачи системной служебной информации в Downlink.

□ PCCH (Paging Control Channel) – пейджинговый канал управления – предназначен для передачи пейджинговых сообщений к UE (MC) от eNodeB (BC).

□ MCCH (Multicast Control Channel) – многопользовательский канал управления – необходим для передачи служебной информации одновременно к нескольким абонентским устройствам.

□ DCCH (Dedicated Control Channel) – выделенный канал управления – служит для передачи служебной информации между конкретным абонентским устройством и сетью.

□ CCCH (Common Control Channel) – общий канал управления – предназначен для обмена служебной информацией между UE (MC) и сетью в процедурах начального доступа UE (MC) в сеть до организации выделенного канала.

#### К трафиковым каналам относятся:

□ DTCH (Dedicated Traffic Channel) – выделенный трафиковый канал – основной канал для передачи пользовательских данных между одним конкретным UE (МС) и сетью.

□ MTCH (Multicast Traffic Channel) – многопользовательский трафиковый канал – служит для передачи широковещательной трафиковой информации. Хорошим примером использования этого канала может служить трансляция радио или ТВ-программ.

### Транспортные каналы на радиointерфейсе в LTE

На радиointерфейсе в сети стандарта LTE применяется стек каналов для передачи данных между абонентским терминалом и сетью. Низший уровень в этом стеке образуют физические каналы. По ним передаются транспортные, которые в свою очередь несут логические каналы.



Рис. 5.102. Транспортные каналы LTE

Рассмотрим виды транспортных каналов на радиointерфейсе сети стандарта LTE. Все транспортные каналы можно классифицировать по направлению передачи: Uplink (от UE (МС) к eNodeB (БС)) и Downlink (от eNodeB (БС) к UE (МС)).

#### К транспортным каналам в Downlink относятся:

- BCH (Broadcast Channel) – широковещательный канал.
- PCH (Paging Channel) – канал для пейджинга.
- DL-SCH (Downlink Shared Channel) – общий канал для передачи данных вниз.
- MCH (Multicast Channel) – многопользовательский канал.

#### К транспортным каналам в Uplink относятся:

- RACH (Random Access Channel) – канал случайного доступа.
- UL-SCH (Downlink Shared Channel) – общий канал для передачи данных вверх.

Как было сказано выше, транспортные каналы передаются в логических каналах. На рисунке ниже представлена связь между логическими и транспортными каналами в LTE.

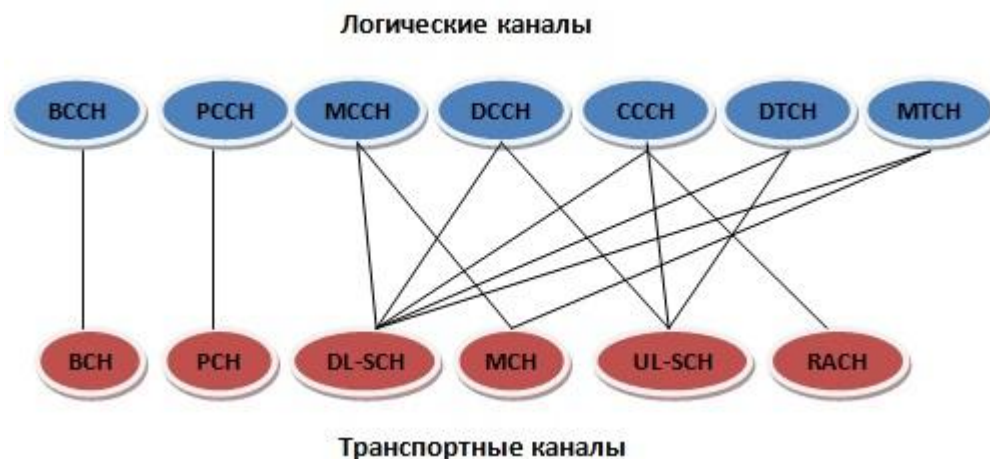


Рис. 5.103. Связь логических и транспортных каналов

### Физические каналы на радиоинтерфейсе в LTE

Информация между UE (МС) и eNodeB (БС) передается не произвольным образом, а через четко организованную структуру каналов. Рассмотрим классификацию, виды и назначение физических каналов в сети LTE.



Рис. 5.104. Физические каналы LTE

Физические каналы можно классифицировать по направлению передачи информации: Downlink и Uplink.

#### К физическим каналам в Downlink относятся:

- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) - физический распределенный канал в направлении «вниз» - служит для высокоскоростной передачи мультимедийной информации.
- PDCCH (Physical Downlink Control Channel) – физический канал управления в направлении «вниз» - предназначен для передачи информации для управления конкретным UE (МС).
- CCPCCH (Common Control Physical Channel) – общий физический канал управления – необходим для передачи общей для всех информации.

#### К физическим каналам в Uplink относятся:

- PRACH (Physical Random Access Channel) – физический канала произвольного доступа – служит для первичного доступа в сеть.

- PUCCH (Physical Uplink Control Channel) – физический канал управления в направлении «вверх» - необходим для передачи служебной информации от конкретной UE (МС) к eNodeB (БС).

- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) – физический распределенный канал в направлении «вверх» - предназначен для высокоскоростной передачи данных в Uplink.

Связь между транспортными и физическими каналами представлена на рисунке ниже.

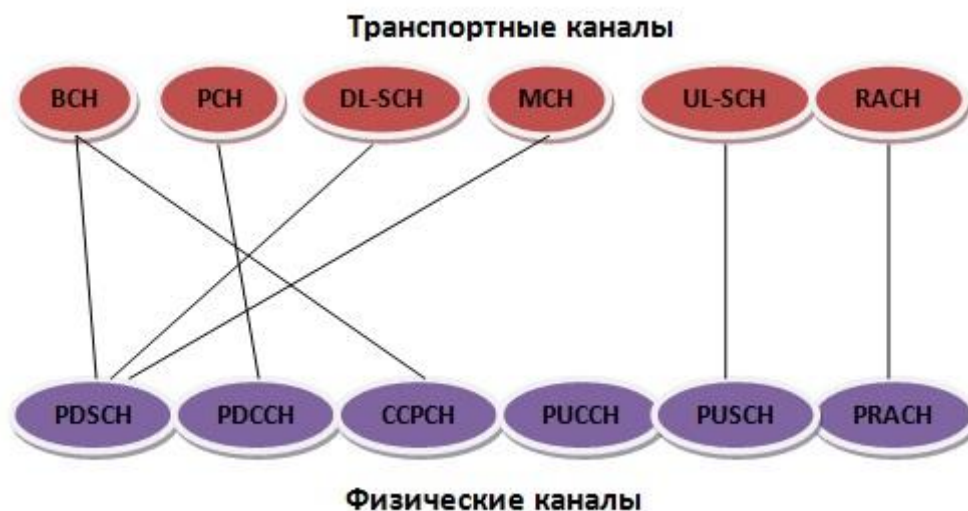


Рис. 5.105. Связь физических и транспортных каналов

### Основные параметры LTE

Таблица 3.16. Основные параметры LTE

Название параметра	Параметр
Uplink (UL): восходящее соединение	SC-FDMA
Downlink (DL): нисходящее соединение	OFDMA
Ширина частотного диапазона, МГц	1,4; 3, 5; 10; 15; 20
Минимальный интервал между кадрами, мс	1
Шаг (частотный интервал) между поднесущими, кГц	15

Стандартная длина префикса CP, мкс	4,7
Увеличенная длина префикса CP, мкс	16,7
Схемы модуляции (Uplink)	BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM
Схемы модуляции (Downlink)	QPSK, 16QAM, 64QAM
Пространственное мультиплексирование	Один канал для Uplink-трафика на каждый абонентский терминал; До 4 каналов для Downlink-трафика на каждый абонентский терминал; MU-MIMO с поддержкой для восходящего (Uplink) и нисходящего (Downlink) соединений

### Практическая реализация

Как было сказано выше, на практике будет реализован канал Downlink системы мобильной связи стандарта LTE. Структура данного канала представлена на рисунке 3.106 [25].

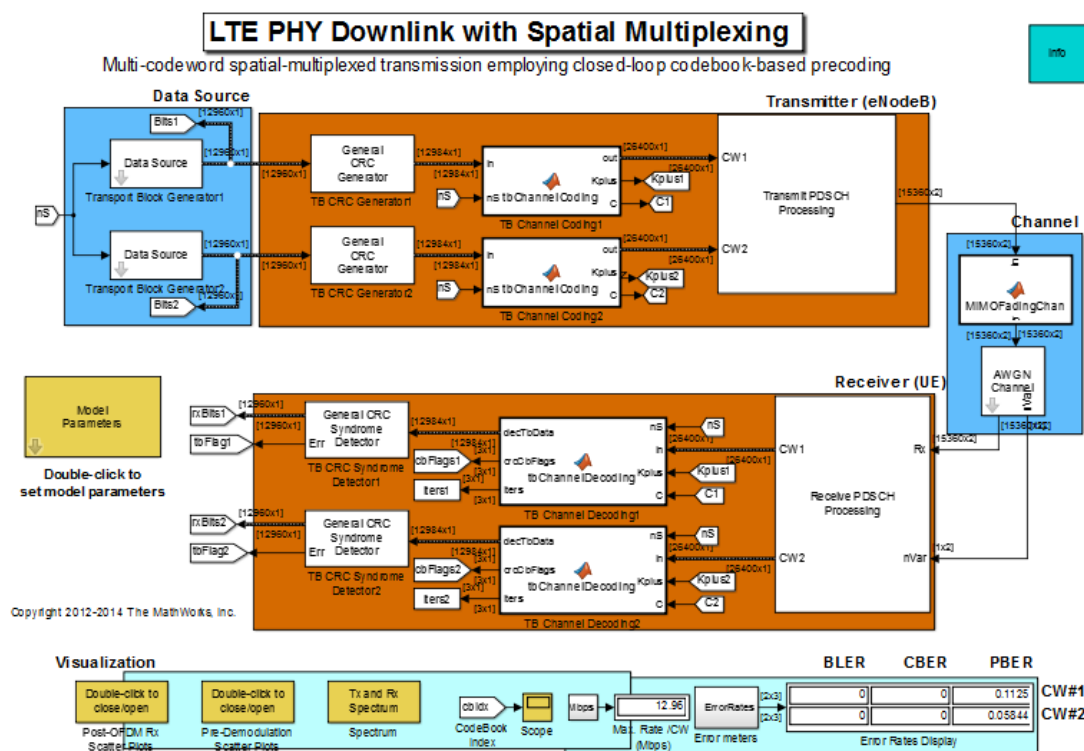


Рис. 5.106. Канал Downlink LTE Simulink MATLAB 2015b

Рассмотрим более подробно данный канал.

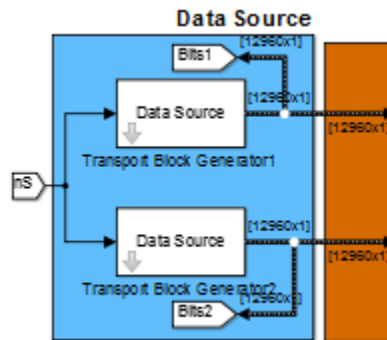


Рис. 5.107. Разделение исходного потока бит на параллельные потоки

- Кодирование помехоустойчивым кодом, в процессе которого значительно увеличивается число символов в отдельных потоках. В данной схеме используется код CRC.

Каждый отдельный параллельный поток кодируется данным кодом с заданным полиномом.

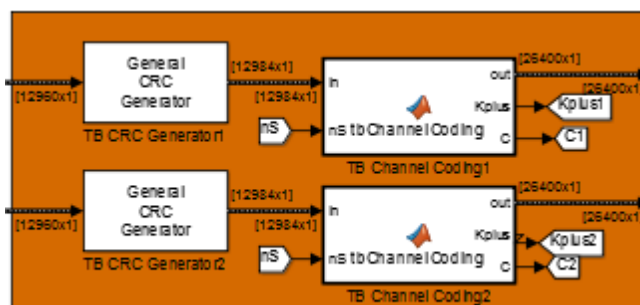


Рис. 5.108. Кодирование помехоустойчивым кодом

General CRC Generator (mask) (link)

Generate CRC bits according to the generator polynomial parameter and append them to the input data frames. Specify the generator polynomial as either a string expressing the polynomial in algebraic form, a hexadecimal string, or as a binary or integer row vector with coefficients in descending order of powers.

This block accepts a binary column vector input signal.

Parameters

Generator polynomial:

```
[1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1] % gCRC24A
```

Initial states:

0

Direct method

Reflect input bytes

Reflect checksums before final XOR

Final XOR:

0

Checksums per frame:

1

Рис. 5.109. Параметры CRC кодера



- Манипуляция выбранным в данный конкретный момент способом модуляции. В канале Downlink используются методы манипуляции: QPSK, 16QAM, 64QAM. Далее перемножение полученной последовательности каждого потока на свою поднесущую и БПФ (так называемая OFDM – модуляция). Где в результате получаем один сложный сигнал.

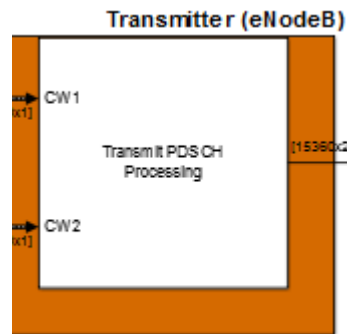


Рис. 5.110. Манипуляция выбранным в данный конкретный момент способом модуляции

Структура этого блока имеет следующий вид:

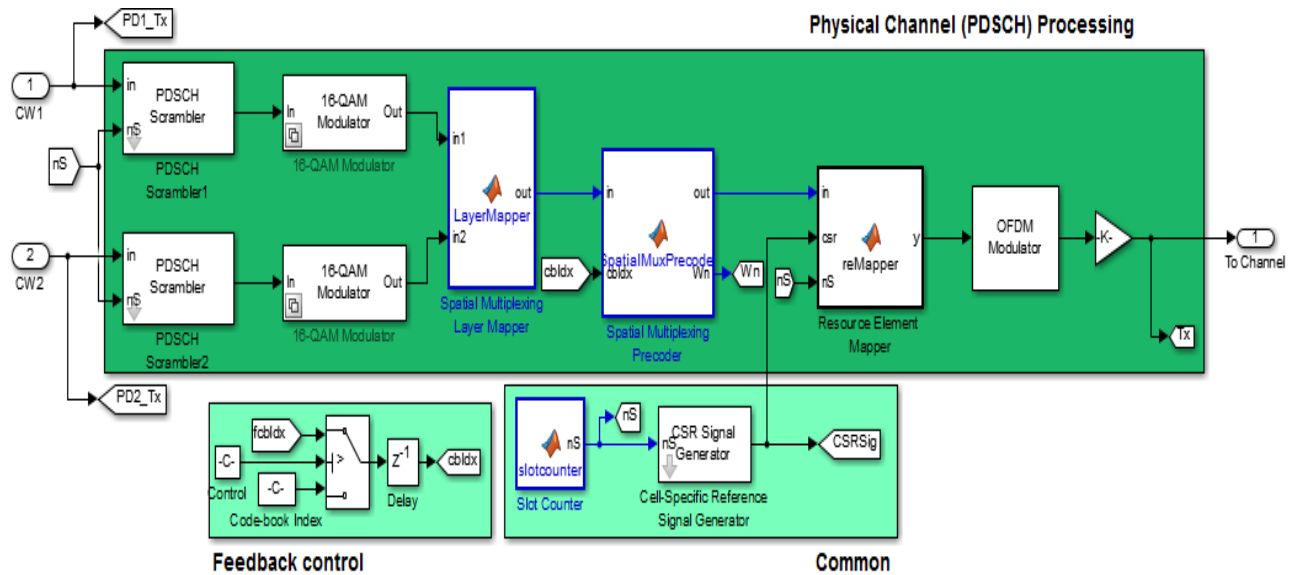


Рис. 5.111. Квадратурная манипуляция и получение OFDM символов

- Передача в эфир. Для этого используется технология MIMO 2x2 или 4x4 приемных/передающих антенн. Где один общий поток (сигнал) разделяется на 2 потока (2x2 антенна) или 4 потока (4x4 антенна).

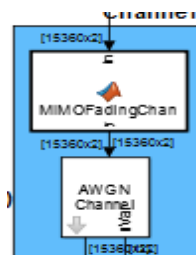




Рис. 5.114. Передача в эфир

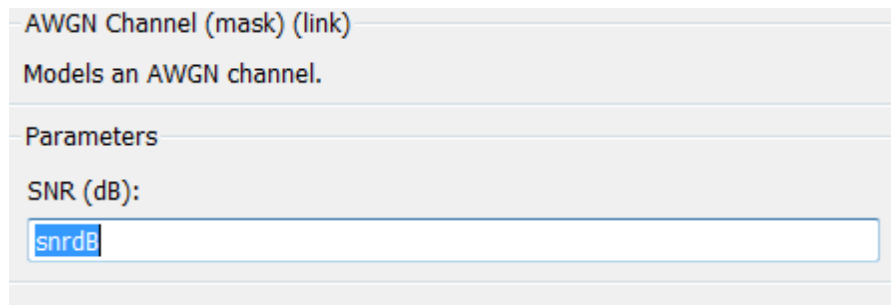


Рис. 5.111. Характеристики блока БГШ (AWGN)

Далее подпотоки MIMO объединяются в один поток, который приходит на мобильную станцию под воздействием помех.

Далее мобильная станция производит обратные преобразования, реализованные выше, а именно, получаем параллельные потоки. Потом производится обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ). Затем производится демодуляция.

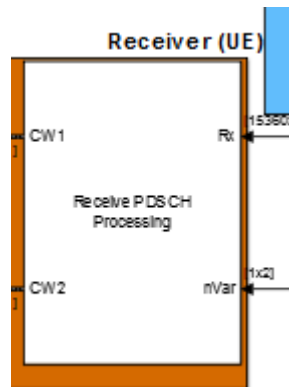


Рис. 5.113. Параллельные потоки-ОБПФ-демодуляция

Схема, входящая в данный блок:

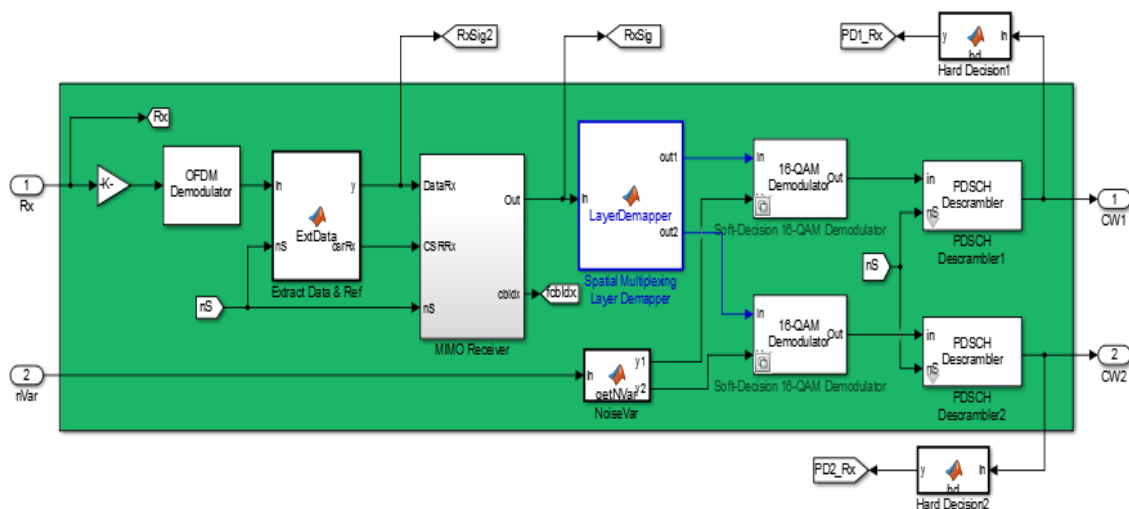


Рис. 5.114. Параллельные потоки-ОДПФ-демодуляция

Далее производится декодирование по соответствующему алгоритму CRC:

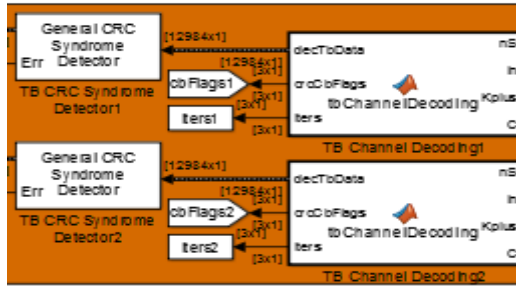


Рис. 5.115. Декодирование CRC

General CRC Syndrome Detector (mask) (link)

Detect errors in the input data frames according to the generator polynomial parameter. Specify the generator polynomial as either a string expressing the polynomial in algebraic form, a hexadecimal string, or as a binary or integer row vector with coefficients in descending order of powers.

The first output is the data frame with the CRC bits removed and the second output indicates if an error was detected in the data frame.

This block accepts a binary column vector input signal.

Parameters

Generator polynomial:

```
[1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1] % qCRC24A
```

Initial states:

0

Direct method

Reflect input bytes

Reflect checksums before final XOR

Final XOR:

0

Рис. 5.116. Характеристики декодера CRC

После декодирования производится преобразование параллельных потоков в один исходный поток:



Рис. 5.117. Получение исходного потока

Данная схема позволяет формировать характеристики передачи данных по этому каналу, а именно это ширина спектра, количество антенн в ММО, вид модуляции, отношение сигнал/шум:

Model Parameters (mask)  
Specifies model parameters for a simulation run.

Parameters

Channel bandwidth (MHz) : 10

Control region (number of OFDM symbols per subframe):  
2

Antenna configuration: 2x2

PDSCH modulation type: 16QAM

Target coding rate:  
1/2

Fading channel model: EPA 0Hz

SNR (dB):  
12.1

Enable PMI feedback

Maximum decoding iterations:  
8

Disable transport-block level early termination

Рис. 5.118. Характеристики канала

В результате работы схемы можно получить некоторые зависимости:

1. Спектр передаваемого и принятого сигнала.
2. Диаграмму созвездий передаваемого и принятого сигнала (для каждой из антенн ММО).
3. Итерации декодера в зависимости от времени и кодовых слов для каждого параллельного потока.

Также можно построить зависимость битовой вероятности ошибки при заданном отношении сигнал/шум каждого параллельного потока отдельно, меняя значения отношения сигнал/шум.

	BLER	CBER	PBER	
	0	0	0.1125	CW#1
	0	0	0.05844	CW#2

Error Rates Display

Рис. 5.119. Информация о битовой вероятности ошибки параллельных потоков

В качестве примера зададим следующие характеристики передачи данных:

- Ширина спектра - 10 МГц.
- Количество антенн ММО – 4x4.
- Модуляция – QPSK.

- Отношение сигнал/шум – 1 дБ.

Model Parameters (mask)  
Specifies model parameters for a simulation run.

Parameters

Channel bandwidth (MHz): 10

Control region (number of OFDM symbols per subframe):  
2

Antenna configuration: 4x4

PDSCH modulation type: QPSK

Target coding rate:  
1/2

Fading channel model: EPA 0Hz

SNR (dB):  
1

Enable PMI feedback

Maximum decoding iterations:  
8

Рис. 5.120. Характеристики передачи данных

В результате получим следующие зависимости:

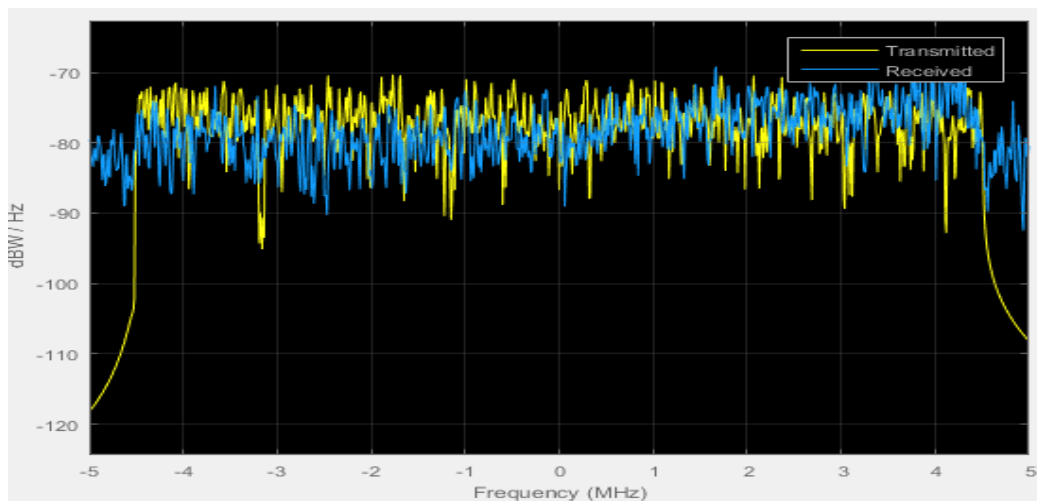


Рис. 5.121. Спектр входного (желтым) и выходного (синим) сигналов

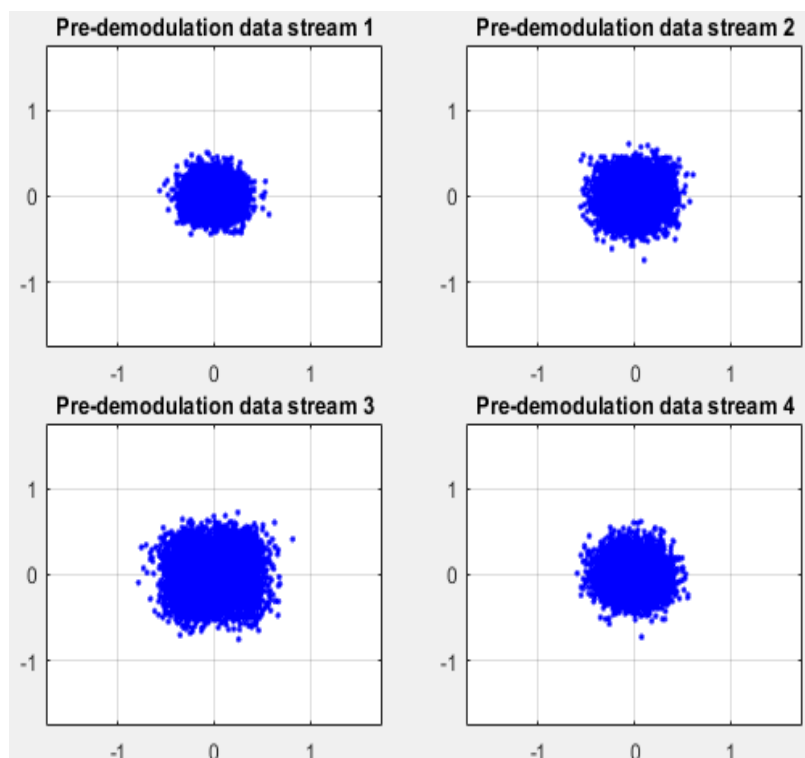


Рис. 5.122. Диаграмма созвездий переданного сигнала для каждой из антенн ММО

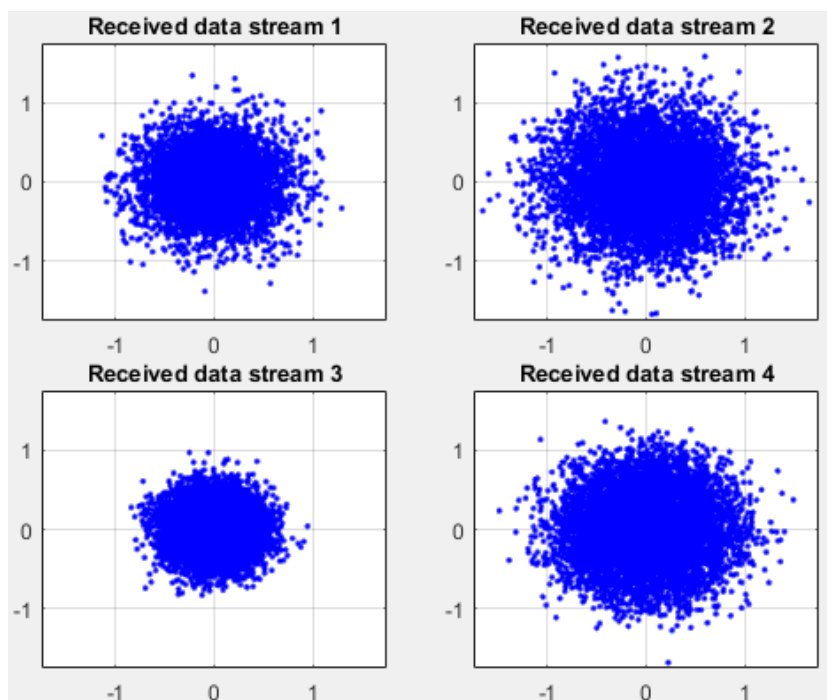


Рис. 5.123. Диаграмма созвездий принятого сигнала для каждой из антенн ММО

На основании полученных значений, построим зависимость.

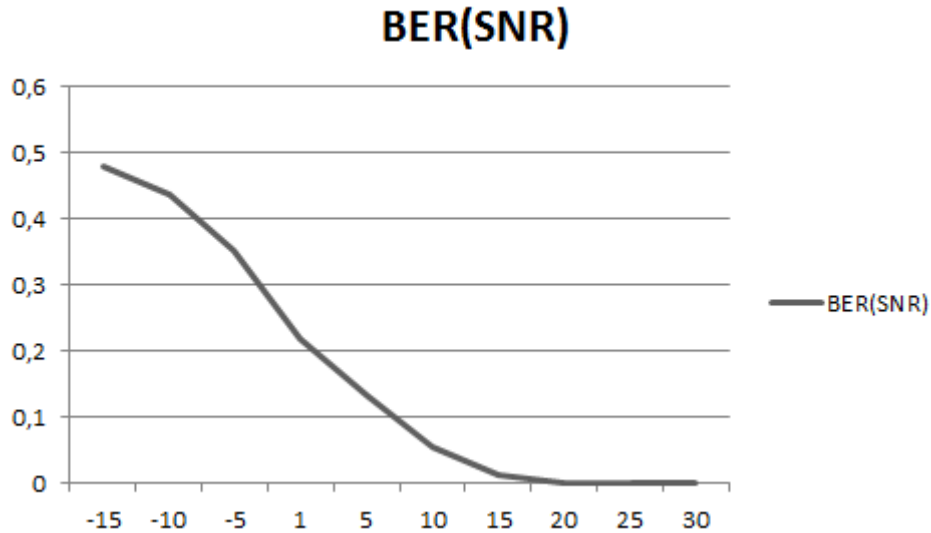


Рис. 5.124. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для первого потока

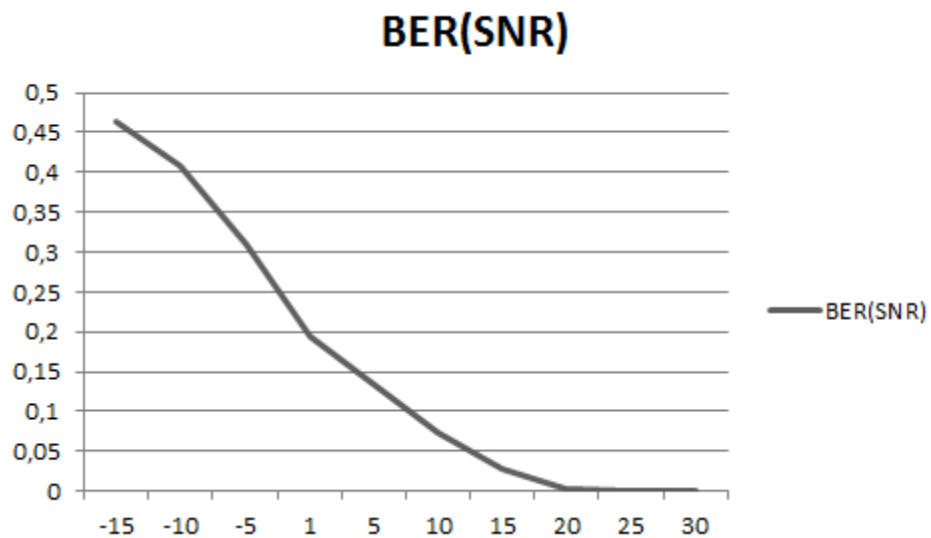


Рис. 5.125. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для второго потока

В качестве еще одного примера зададим следующие характеристики передачи данных:

- Ширина спектра - 10 МГц.
- Количество антенн ММО – 2x2.
- Модуляция – QPSK.
- Отношение сигнал/шум – 1 дБ.

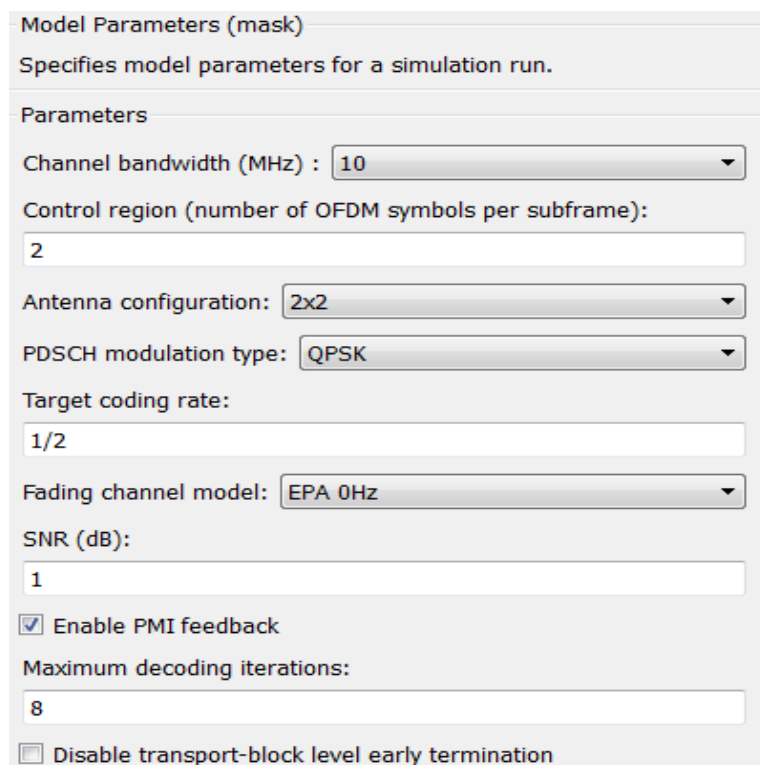


Рис. 5.126. Характеристики передачи данных

В результате получим следующие зависимости:

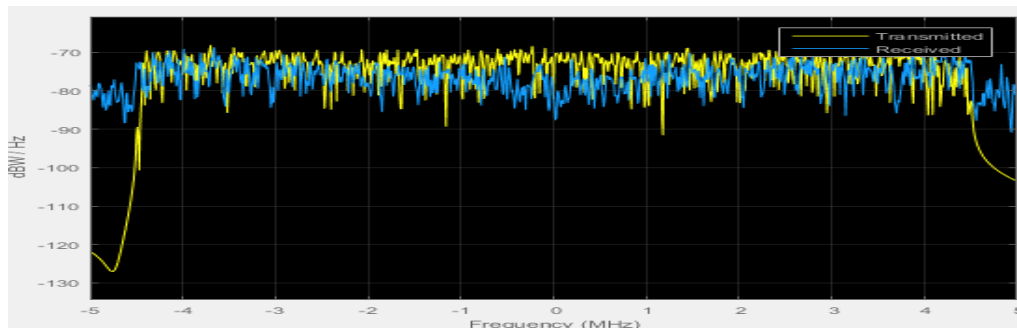


Рис. 5.127. Спектр входного (желтым) и выходного (синим) сигналов

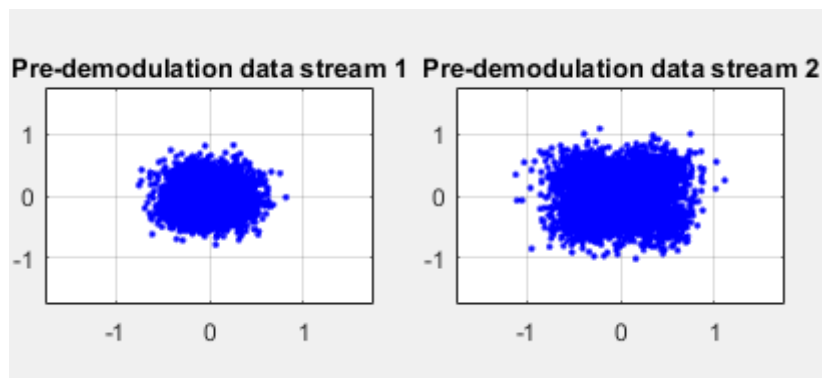


Рис. 5.128. Диаграмма созвездий переданного сигнала для каждой из антенн MIMO

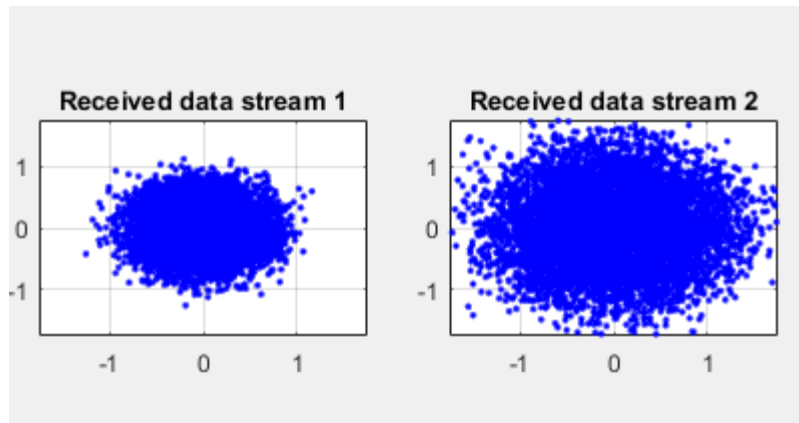


Рис. 6.129. Диаграмма созвездий принятого сигнала для каждой из антенн ММО

Изменим отношение сигнал/шум – -15, -10, -5, 1, 5, 10, 15, 20, 25 и 30 дБ и построим зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для десяти точек для обоих параллельных потоков

На основании полученных значений, построим зависимость.

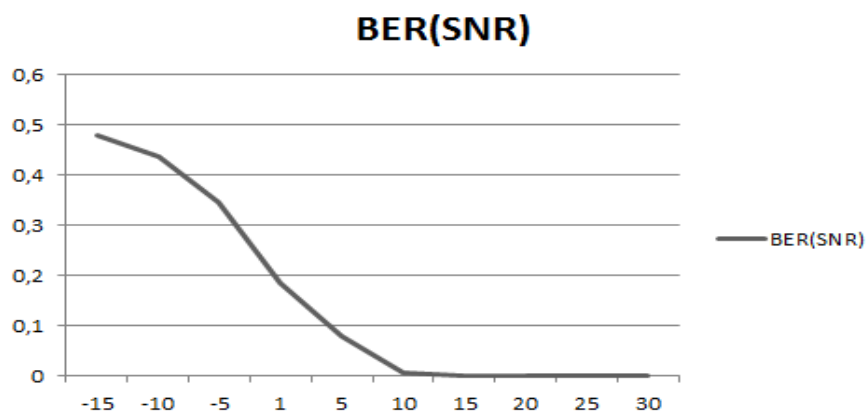


Рис. 5.130. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для первого потока

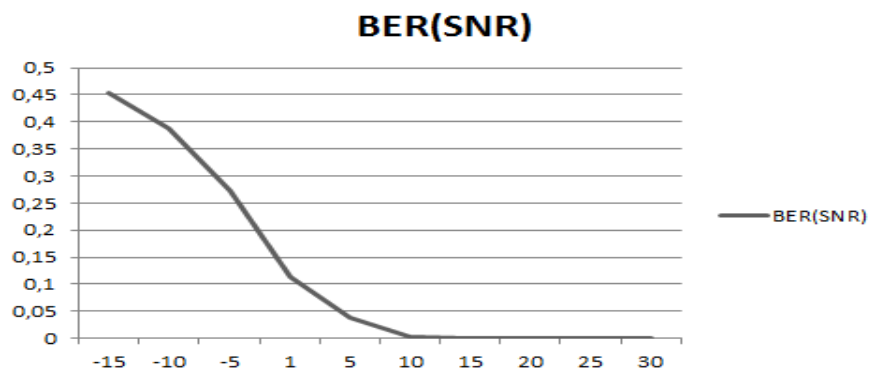


Рис. 5.131. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для второго потока

### Методика и проведение исследования канала Downlink

Запустить Matlab 15 от имени администратора (обязательно).



В результате запуска на экране монитора появится следующее окно:

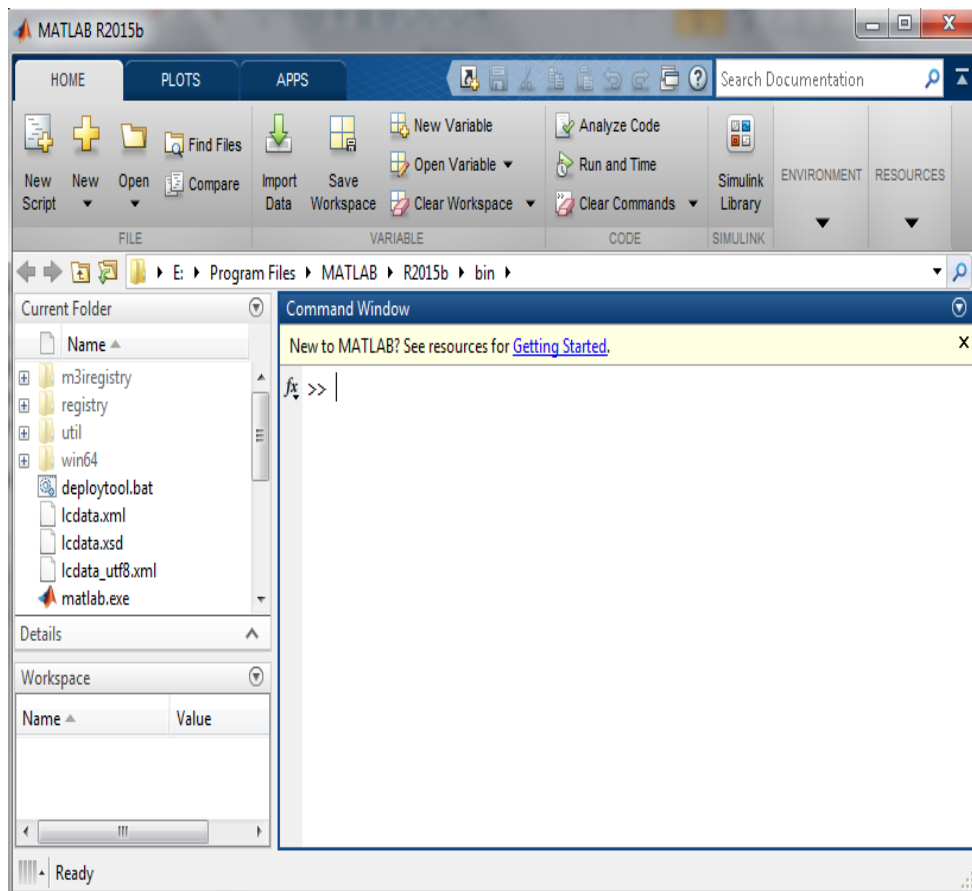


Рис. 5.132. Диалоговое окно Matlab 15

1. В командной строке программы прописать: `cd ../` (при пропуске данного пункта могут возникнуть проблемы при компиляции).
2. В командной строке программы прописать `LTEDownlinkExample`, в результате откроется окно со схемой в программе, которое имеет следующий вид:

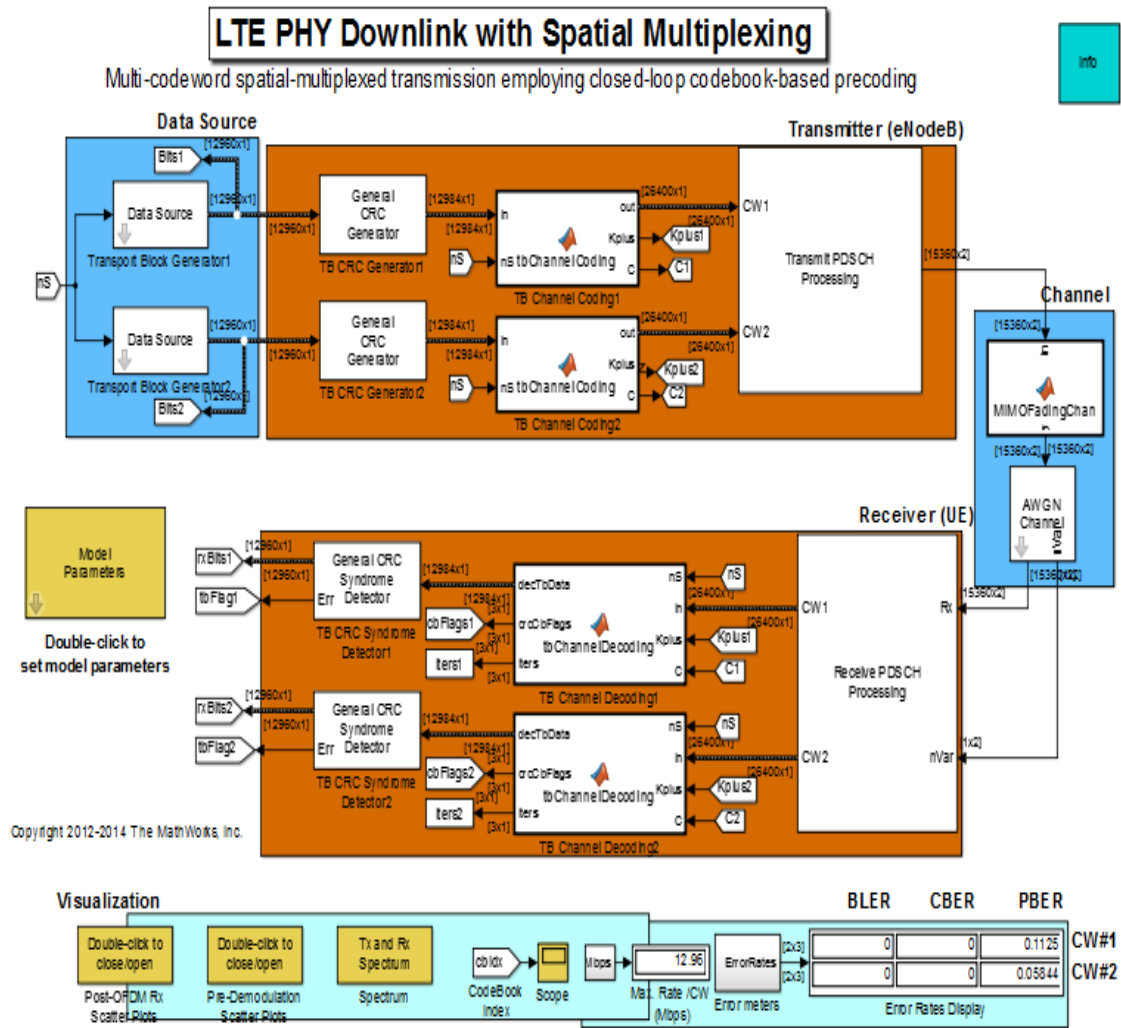


Рис. 5.133. Схема канала Downlink

3. Задать следующие характеристики передачи данных:
  - Модуляция – QAM-16.
  - Количество антенн ММО 2x2.
  - Ширина спектра – 10 МГц.
4. Изменять отношение сигнал/шум – -15, -10, -5, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 дБ (SNR) и на каждом его значении фиксировать в отчете выходные зависимости, а именно спектр переданного и принятого сигналов, диаграммы созвездий на каждой из антенн ММО для переданного и принятого сигналов, итерации декодера в зависимости от времени и кодовых слов первого потока и второго потока. Так же на каждом шаге фиксировать значение битовой вероятности ошибки (BER) обоих параллельных потоков. И после окончания исследования построить зависимости BER от SNR обоих параллельных потоков.
5. Содержание отчета
  - Титульный лист.
  - Цель работы.
  - Теория канала Downlink.

- Исследуемая схема канала Downlink.
- Результаты работы по пунктам 6 и 7.
- Заключение.

В результате выполнения в разделе были выполнены следующие мероприятия:

1. Проведен теоритический анализ стандарта мобильной связи стандарта LTE. Проведен анализ сравнения данного стандарта с уже устаревающими стандартами на данный момент – UMTS (3G) и GSM (2G). Также было проведено аналитическое исследование физических каналов стандарта – Downlink (от БС к МС) и Uplink (от МС к БС), а также логические и транспортные каналы. Приведены обобщенные схемы формирования данных каналов.

2. Путем проведения компьютерной симуляции, была проверена достоверность теоритического исследования. В программе Matlab 15 были собрана схема канала Downlink.

3. С помощью компьютерной симуляции были получены различного рода зависимости при передаче информации по каналу. Самая важная из них это зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум. В результате получились следующие значения:

Таблица 3.17. Зависимость BER от SNR при MIMO 4x4

<b>сигнал/шум (дБ)</b>	<b>1 поток (BER)</b>	<b>2 поток (BER)</b>
<b>-15</b>	0,4766	0,4537
<b>-10</b>	0,4347	0,3876
<b>-5</b>	0,3456	0,2729
<b>1</b>	0,1836	0,114
<b>5</b>	0,0774	0,039
<b>10</b>	0,0076	0,0027
<b>15</b>	0,000001	0,000002
<b>20</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>25</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>30</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Таблица 3.18. Зависимость BER от SNR при MIMO 2x2

сигнал/шум (дБ)	1 поток (BER)	2 поток (BER)
<b>-15</b>	0,4772	0,4645
<b>-10</b>	0,4354	0,4073
<b>-5</b>	0,3512	0,3096
<b>1</b>	0,2178	0,1933
<b>5</b>	0,1347	0,1345
<b>10</b>	0,056	0,074
<b>15</b>	0,0137	<b>0,0282</b>
<b>20</b>	0,0003	0,0037
<b>25</b>	<b>0</b>	0,000003
<b>30</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

4. Анализируя полученные значения таблицы 3, можно сделать следующий вывод, что при увеличении отношения сигнал/шум, битовая вероятность ошибки стремится к нулю быстрее в MIMO 4x4, нежели в MIMO 2x2. Таким образом, использование большего числа приемо-передающих антенн, дает меньшие ошибки.

5. Была написана методика исследования канала Downlink.

6. Также я познакомился с различным программным обеспечением, для построения различного вида схем.

Подводя итог своего курсового проекта, можно сказать следующее, то, что я сделал, является основополагающим делом к дальнейшим, более трудным вещам. Курсовой проект был весьма увлекательным и полезным. С поставленными целями справился успешно.

## **5.8. Проектирование защищенных систем цифрового телевизионного вещания**

### **Проектирование защищенной системы системы цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T [17, 21]**

Объектом исследования является система цифрового телевидения на базе стандарта DVB-T. Цель лабораторной работы – закрепленных знаний полученных при изучении дисциплины «Основы проектирования защищенных телекоммуникационных систем». Задача лабораторной работы – исследование основных характеристик системы цифрового наземного телевидения стандарта DVB-T.

В 1993 году группа ведущих европейских компаний-производителей вещательного оборудования образовала некоммерческую организацию по разработке стандартов цифрового телевизионного вещания, получившую название DVB Project.

Для каждой транспортной среды был разработан стандарт обработки и передачи транспортно потока, учитывающий ее специфику и в то же время максимально инфицированный со смежными стандартами. Для упрощения взаимного обмена программами выбраны такие параметры обработки, чтобы пропускная способность и число передаваемых ТВ программ во всех случаях оставались бы примерно одинаковыми. Документ для спутникового вещания получил сокращенное наименование DVB-S, для сетей кабельного телевидения - DVB-C, для наземного (эфирного) телевидения DVB-T.

#### **Концепция стандарта DVB-T**

Одним из первых решений данной организации было решение принять за основу всех разработок стандарт цифрового сжатия MPEG-2. Однако, данный стандарт не охватывает передачу цифрового сигнала по каналам связи и его необходимо дополнить документами, регламентирующими обработку сигнала перед подачей в канал.

Второе важное решение – использование общего MPEG-2 мультиплекса во всех средах распространения и максимальная унификация методов помехоустойчивого кодирования и модуляции. Во всех случаях используется код Рида-Соломона с единым размером блока, и в тех случаях где это необходимо, - сверточный код с единым набором относительных скоростей. Очень важна для широкого круга концепция «контейнера данных» - создание универсального цифрового канала, переносящего видео, аудио, данные пользователя в любых пропорциях и с высокими показателями качества обслуживания.

Передаваемая информация в системе DVB-T представляет собой пакеты транспортного потока MPEG-2. Для рассматриваемой системы содержание контейнера не имеет значение, она лишь приспособливает данные транспортного мультиплекса

MPEG-2 к свойствам и характеристикам канала передачи наземного телевизионного вещания, стремясь наиболее эффективно донести их приемнику. Иными словами, стандарт DVB-T определяет только структуру передаваемого потока данных, систему канального кодирования и модуляции.

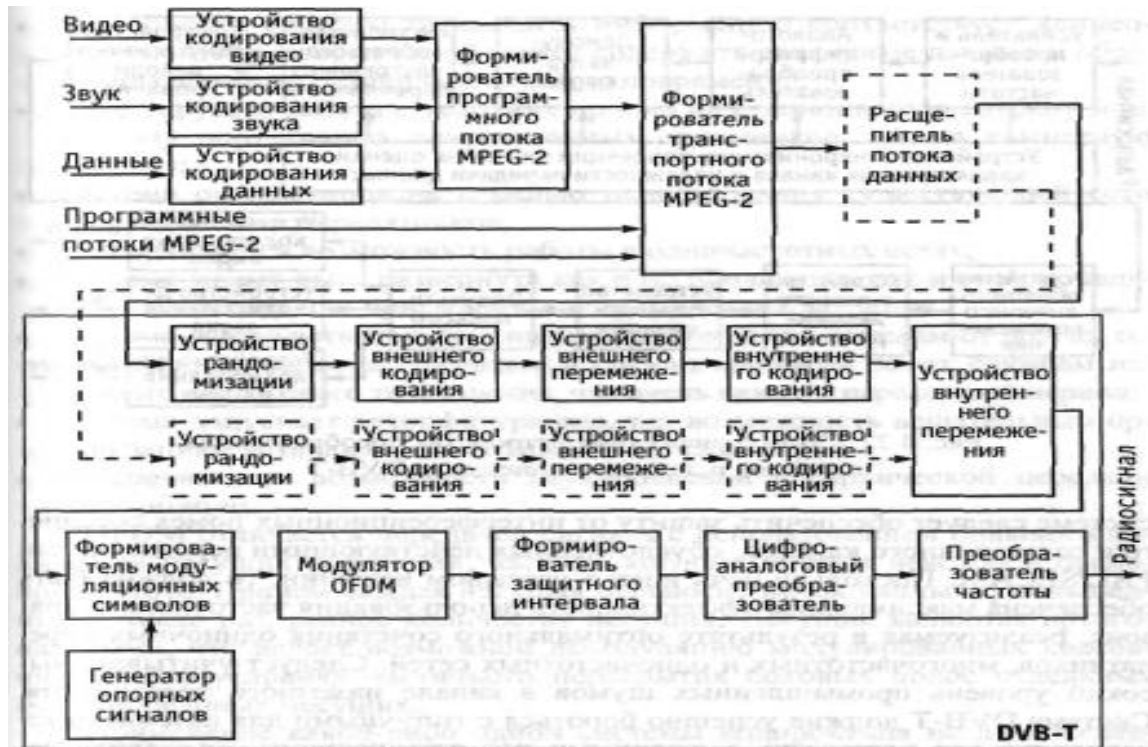


Рис. 5.134. Структурная схема передатчика системы DVB-T

На приемной стороне выполняются операции, обратные операциям производимым в приемнике.



Рис. 5.135. Структурная схема приемника системы DVB-T

### Обработка данных и сигналов в системе DVB-T

#### Адаптация транспортных пакетов MPEG-2 в системе DVB-T. Рандомизация

Адаптация транспортных пакетов MPEG-2 в исследуемой системе осуществляется путем включения в общий поток информационных 187 байт одного байта синхронизации.



Рис. 5.136. Адаптация транспортных пакетов в системе MPEG-2

Рандомизация данных является первой операцией, выполняемой в системе DVB-T. Ее цель – превратить цифровой сигнал в квазислучайный и тем самым решить две важные задачи. Первая – обеспечение возможности выделения из него тактовых импульсов (самосинхронизация). Вторая – приведение более равномерного энергетического спектра излучаемого радиосигнала. Рандомизация осуществляется путем сложения по модулю 2, то есть посредством логической операции «исключающее ИЛИ» цифрового потока данных и двоичной псевдослучайной последовательности.



Рис. 5.137. Структурная схема устройства рандомизации данных

#### Внешнее кодирование и перемежение

Как было отмечено выше, в системе внешнего кодирования для защиты всех 188 байт транспортного пакета (включая байт синхронизации) используется код Рида-Соломона (204, 188). В процессе кодирования к этим 188 байтам добавляется 16 проверочных байт. Стоит отметить, что при декодировании на приемной стороне это

позволяет исправлять до восьми ошибочных байт в пределах каждого кодового слова длиной 204 байта.

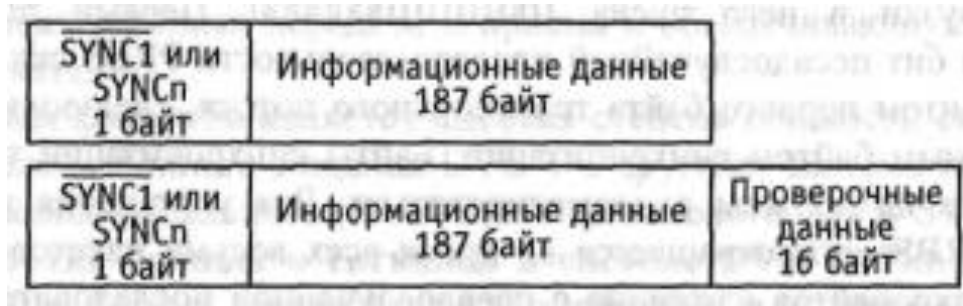


Рис. 5.138. Структурная схема устройства рандомизации данных

Внешнее переименование осуществляется путем изменения порядка следования байт в пакетах, защищенных от ошибок. В соответствии со схемой представленной на слайде переименование выполняется путем последовательного циклического подключения источника и получателя данных к двенадцати ветвям, причем за одно подключение в ветвь направляется и снимается 1 байт данных. В одиннадцати ветвях включены регистры сдвига, содержащие разное количество ячеек и создающие увеличивающиеся от ветви к задержку. Первый же синхробайт поступает в 0 ветвь, которая не содержит задержки, что не создает проблем синхронизации.

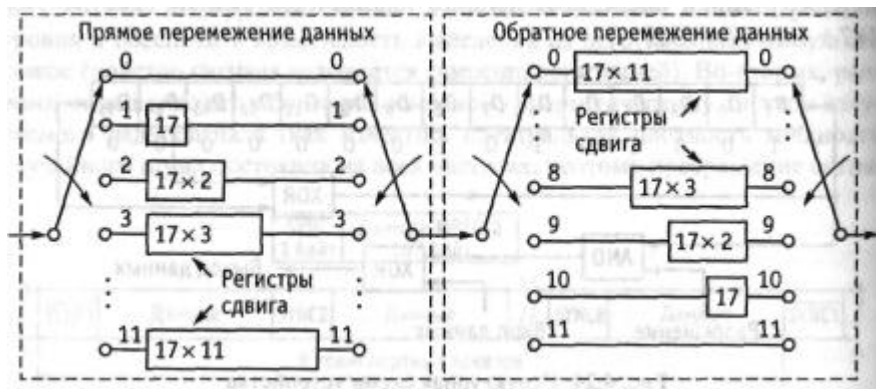


Рис. 5.139. Функциональная схема внутреннего перемежителя данных

### Внутреннее кодирование

Функциональная и структурная схема кодера/декодера сверточного кода используемого в системе DVB-T может быть представлена в следующем виде:

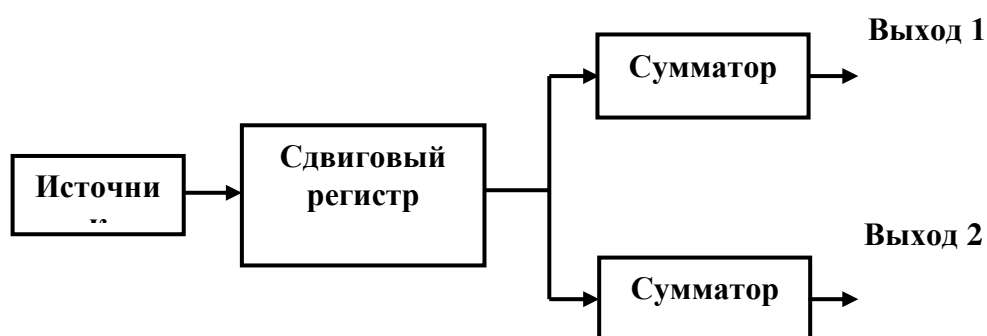




Рис. 5.140. Структурная схема сверточного кодера

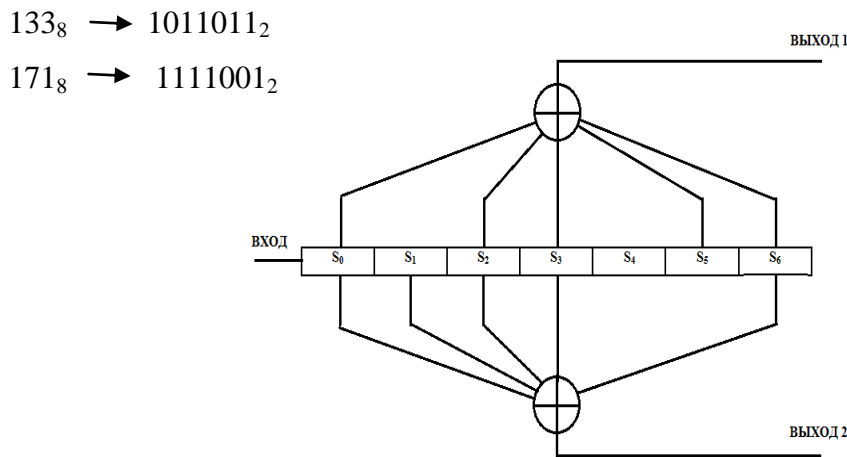


Рис. 5.141. Функциональная схема сверточного кодера 133,171

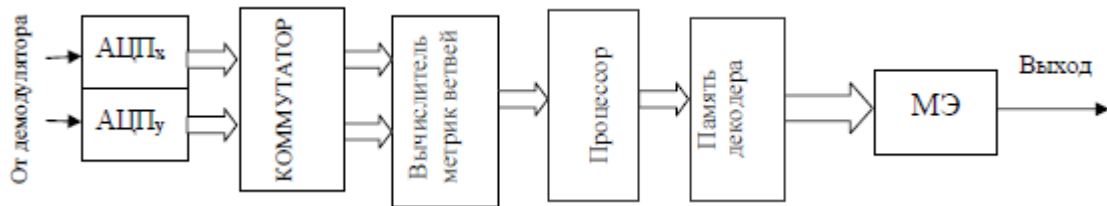


Рис. 5.142. Структурная схема декодера Витерби

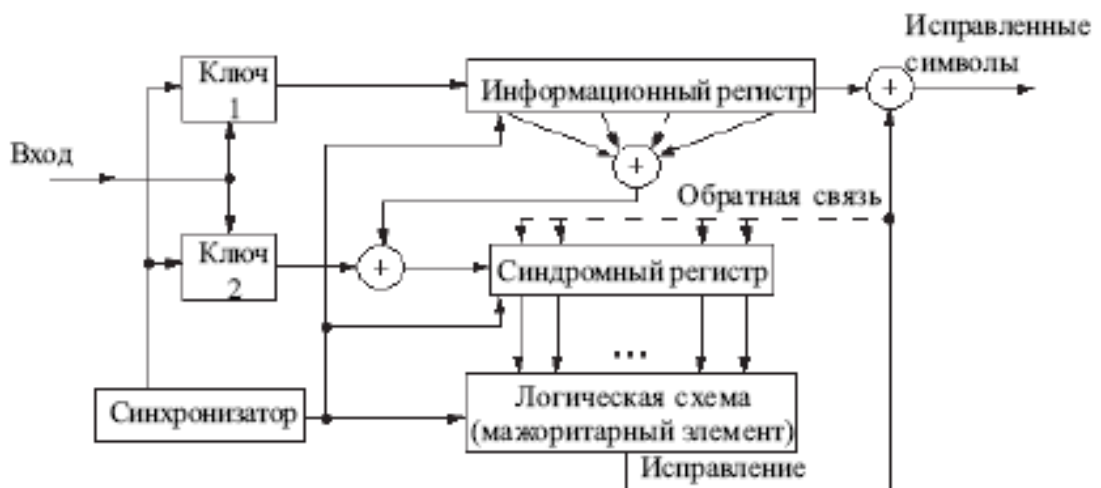


Рис. 5.143. Функциональная схема декодера Витерби

### Внутреннее переключение

Как показано на слайде внутреннее переключение осуществляется в два этапа. На первом этапе цифровой поток с выхода сверточного кодера разделяется на  $m$  парциальных потоков. Каждый из потоков делится на блоки длиной 126 битов и

поступает на отдельный блоковый перемежитель битов с поразрядным перемежением. Функция перемежения представлена на слайде.

Выходные потоки перемежителей группируются по одному биту с каждого выхода, образуя  $m$ -битовые кодовые слова, поступающие на вход символьного перемежителя.

$$\begin{aligned}
 H_0(w) &= w; \\
 H_1(w) &= (w + 63) \bmod 126; \\
 H_2(w) &= (w + 105) \bmod 126; \\
 H_3(w) &= (w + 42) \bmod 126; \\
 H_4(w) &= (w + 21) \bmod 126; \\
 H_5(w) &= (w + 84) \bmod 126.
 \end{aligned}$$

Рис. 5.143. Функция битового перемежения для QAM-64

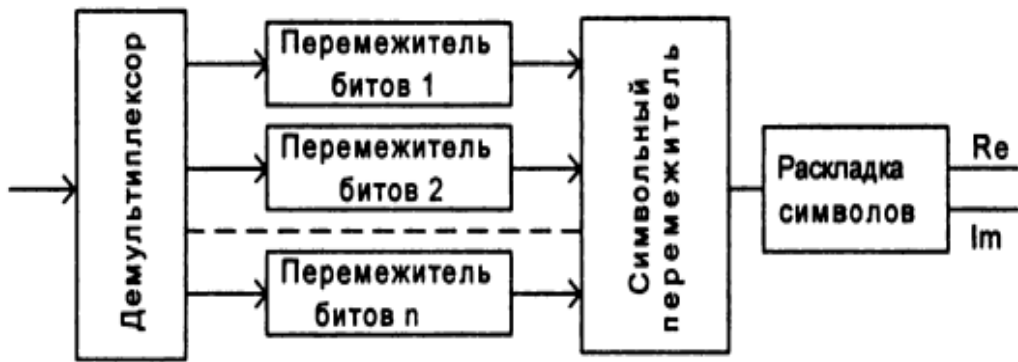


Рис. 5.144. Структурная схема внутреннего перемежителя системы DVB-T

### Модуляция в системе DVB-T

В системе цифрового наземного телевизионного вещания используются следующие виды модуляции: QPSK, QAM-16 и QAM-64. Диаграммы созвездий

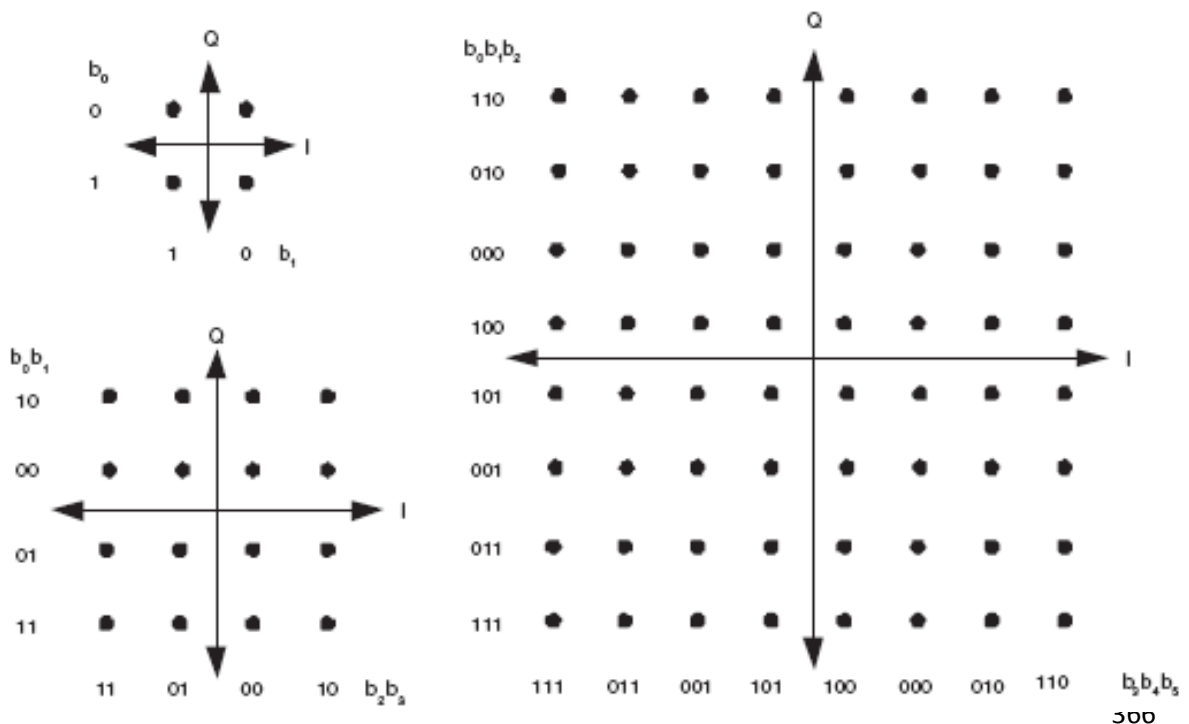


Рис. 5.145. Виды модуляции используемые в системе DVB-T

С внутреннего перемежителя биты поступают на модулятор QAM-64, затем происходит распределение по поднесущим с добавлением пилот-сигналов. К сформированному спектру применяется операция обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT), добавляется циклический префикс. Далее полученный символ передается через канал с шумом и затем производятся обратные операции в приёмнике.

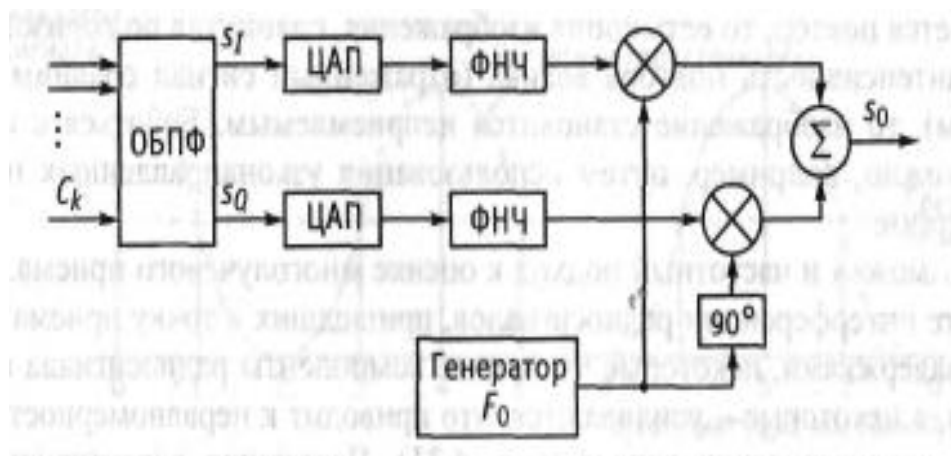


Рис. 5.146. Структурная схема формирователя OFDM-символа в системе DVB-T



Рис. 5.147. Структура OFDM-символа в системе DVB-T

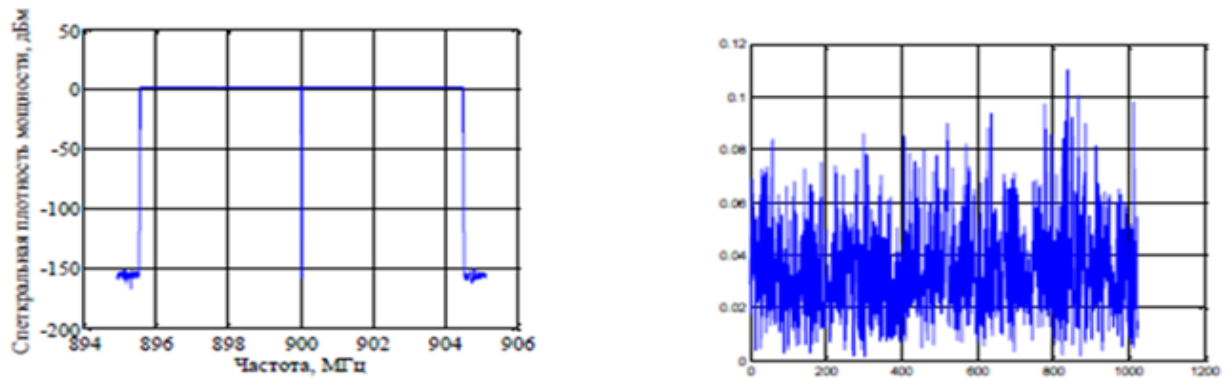


Рис. 5.148. Спектральное и временное представление OFDM-сигнала

### Практическая часть [25]

В первую очередь была запущена модель системы DVB-T в программе Matlab следующим образом: Matlab R2015b – Simulink Library Browser – Open – dvbt.slx.

#### – Simulink

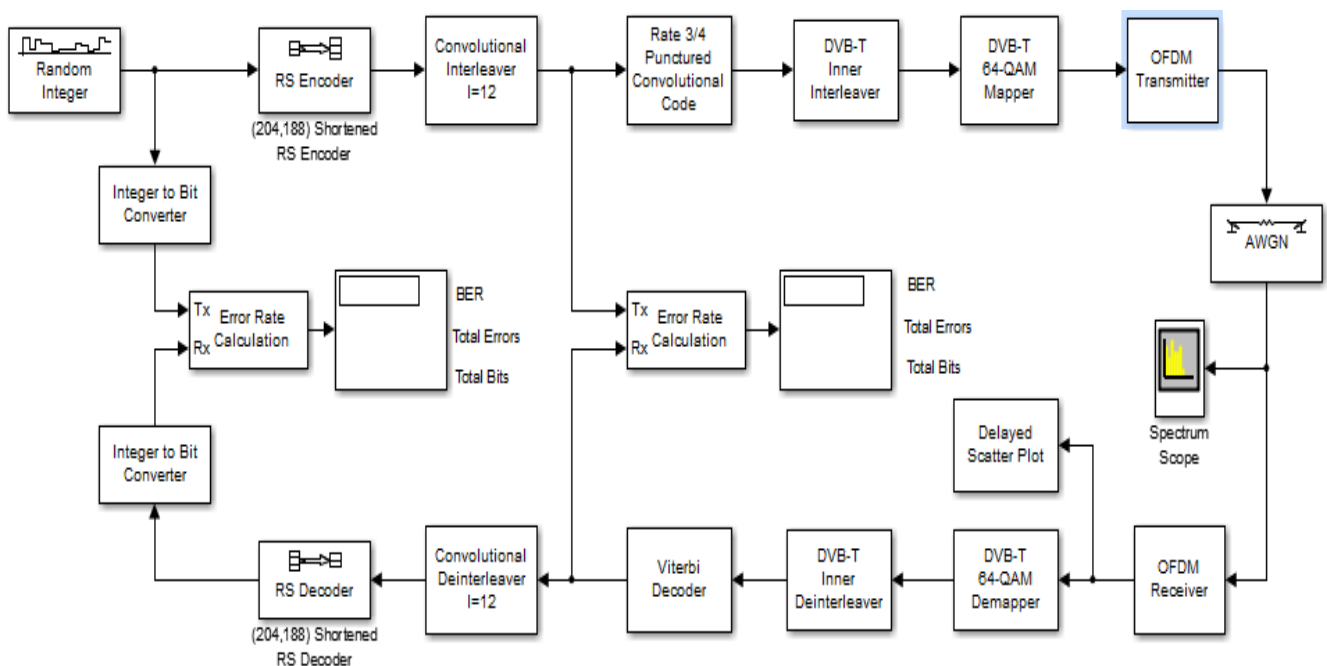


Рис. 5.149. Функциональная схема системы DVB-T реализованная в Matlab R2015b

Затем была исследована зависимость битовой вероятности ошибки (BER) от отношения сигнал/шум (SNR), путем изменения параметра SNR в блоке AWGN в диапазоне от 1 дБ до 25 дБ с шагом 4 дБ.

Результаты измерений представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Зависимость BER от SNR для системы DVB-T

SNR, дБ	1	5	9	13	17	21	25

<b>BER</b>	0.5	0.49	0.47	0.29	0.001	$5 \times 10^{-6}$	0
					6	6	

На основании данных представленных в таблице 5.1 был построен график зависимости битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум.

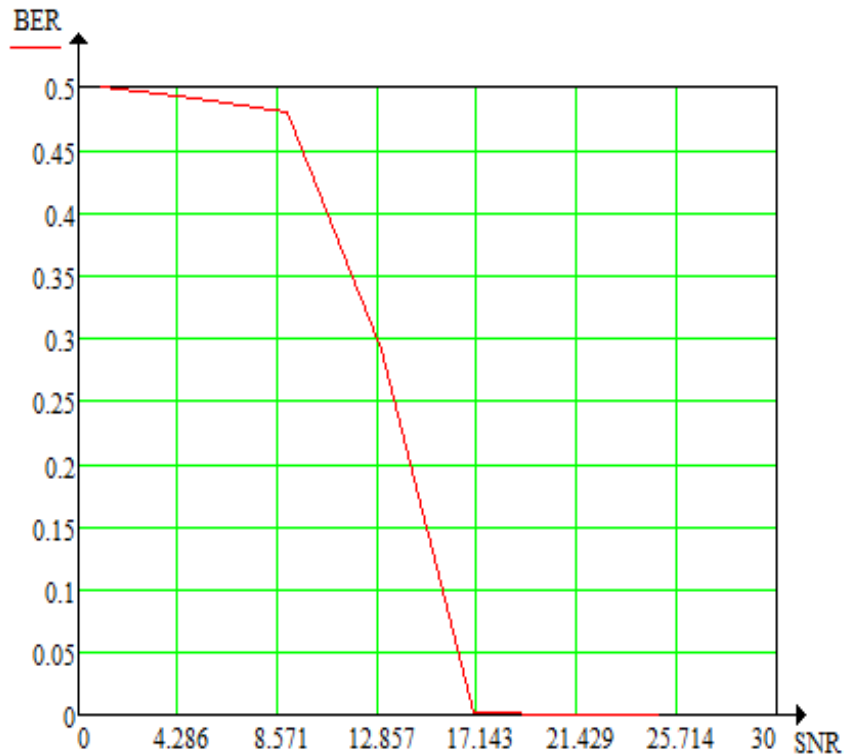


Рис. 5.150. Зависимость BER от SNR для системы DVB-T при использовании 64-QAM

При исследовании зависимости битовой вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум рассматриваемой системы телевизионного вещания были сняты изображения спектра передаваемого сигнала и диаграммы созвездий 64-QAM исследуемой системы при SNR равном 1 дБ, 13 дБ и 25 дБ.

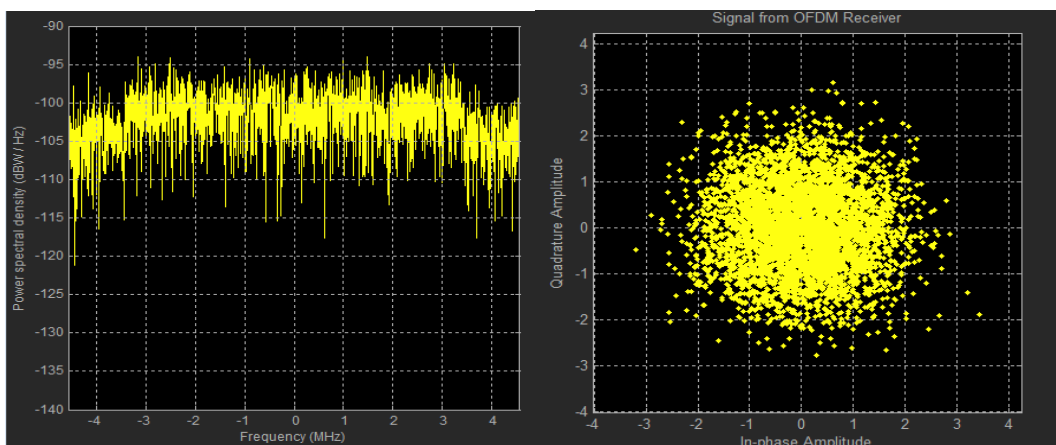


Рис. 5.151. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 64-QAM при SNR=1 дБ

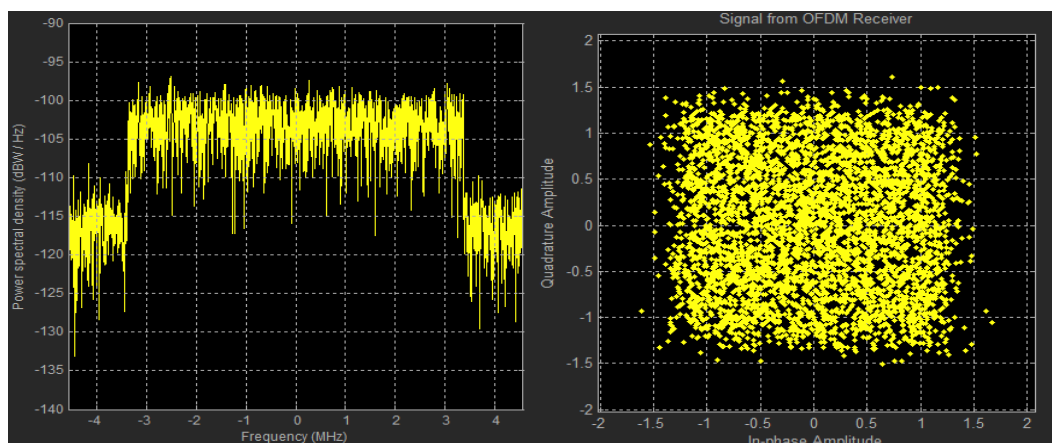


Рис. 5.152. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 64-QAM при SNR=13 дБ

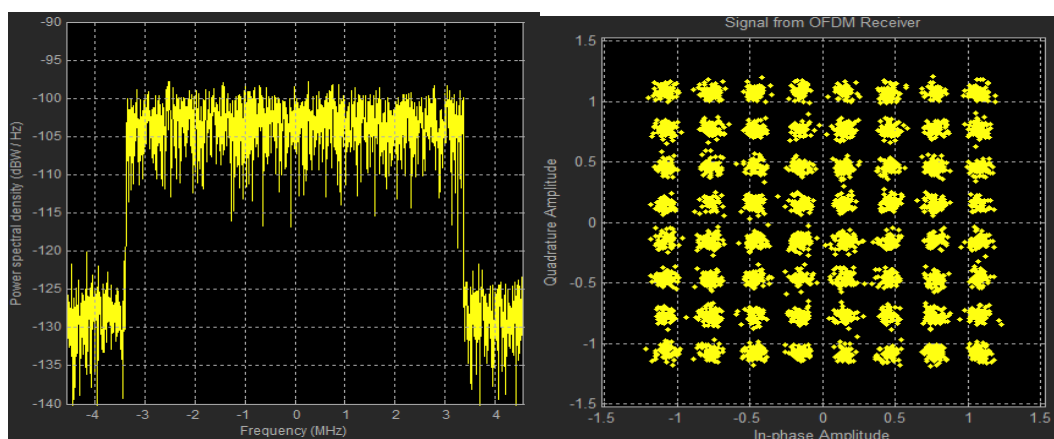


Рис. 5.153. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 64-QAM при SNR=25 дБ

В процессе выполнения данной работы были изучены основные теоретические аспекты системы цифрового наземного телевизионного стандарта DVB-T.

При выполнении практической части работы была построена зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум, результат представлен в виде графика (рисунок 4.21). Полученная в ходе моделирования зависимость соответствует теоритическим данным.

Вместе с этим, были сняты изображения спектра OFDM-символа и диаграммы созвездий 64-QAM при прохождении сигнала в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

Полученные в результате моделирования данные позволяют сделать вывод о том, что безошибочная передача данных по каналу связи в системе DVB-T возможна при отношении сигнал/шум не менее 17 дБ.

## 5.9. Проектирование защищенной системы цифрового спутникового телевизионного вещания DVB-S и системы высокоскоростного цифрового спутникового ТВ-вещания DVB-S2 [17, 25]

Методы модуляции и канального кодирования DVB-S используются для первичного и вторичного распределения спутникового цифрового многопрограммного ТВ/ТВЧ в полосах системы стационарной спутниковой связи (FSS — Fixed Satellite Service) и системы спутникового вещания (BSS — Broadcast Satellite Service). Система предназначена для обеспечения сервиса «непосредственно-на-дом» (Direct To Home — DTH) с использованием потребительского интегрированного приемника-декодера (IRD — Integrated Receiver Decoder), а также для систем коллективного приема (SMATV — Satellite Master Antenna Television) и головных станций кабельного телевидения с возможностью повторной модуляции.

Таблица 5. 2. Максимальная скорость битового потока при ширине полосы телевизионного канала 8 МГц

Тип модуляции	Скорость кодирования	Рекомендуемая максимальная скорость, Мбит/с	Длина T2-кадра, OFDM-символов	Число кодовых слов в кадре
QPSK	1/2	7,4442731	60	50
	3/5	8,9457325		
	2/3	9,9541201		
	3/4	11,197922		
	4/5	12,948651		
16-QAM	1/2	15,037432	60	101
	3/5	18,07038		
	2/3	20,107323		
	3/4	22,619802		
	4/5	24,136276		
64-QAM	1/2	22,481705	60	151
	3/5	27,016112		
	2/3	30,061443		
	3/4	33,817724		
	4/5	36,084927		
256-QAM	1/2	30,074863	60	202
	3/5	36,140759		
	2/3	40,214645		
	3/4	45,239604		
	4/5	48,272552		
	5/6	50,524472		

В системе применена модуляция QPSK и защита от ошибок на основе сверточного кода и сокращенного кода Рида-Соломона. Система может быть использована в спутниковых ретрансляторах с различной шириной полосы.

На рис. 5.22 приведена функциональная структурная схема передающей части системы DVB-S. Система непосредственно совместима с телевизионными сигналами, закодированными по стандарту MPEG-2.

Техника помехоустойчивого кодирования, принятая в системе, разработана в целях достижения «квазибезошибочного» (QEF — Quasi-Error-Free) режима работы, при котором возможно возникновение менее одного случая неисправимой ошибки на час передачи, что соответствует уровню ошибки (BER — Bit Error\_Ratio)  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  на входе демультимплектора MPEG-2.

При адаптации сигнала к спутниковому каналу связи осуществляются следующие операции:

- адаптация транспортного мультимплексирования с использованием статистического кодирования, аналогичного используемому в системе DVB-T ;
- внешнее кодирование с использованием кода Рида-Соломона RS(204,188,t = 8);
- сверточное перемежение;
- внутреннее кодирование с использованием сверточного кода с выкалыванием;
- система предусматривает сверточное кодирование со скоростями кода 1/2, 2/3, 3/4, 5/6  
и 7/8;
- формирование сигнала в основной полосе частот;
- модуляция QPSK.

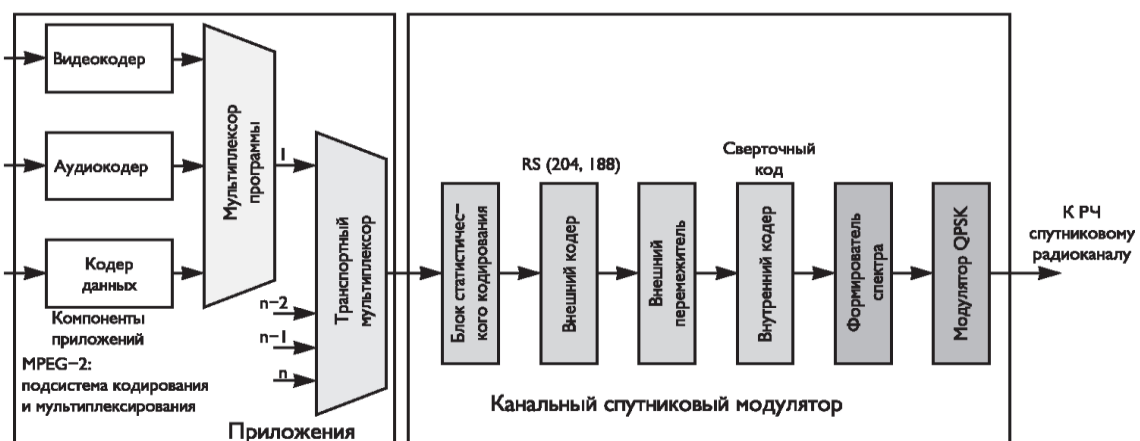


Рис. 5.154. Структурная схема передающей части системы DVB-S

DVB-S, принятый еще 1994 году, определяет структуру транспортных пакетов, канальное кодирование и схемы модуляции при передаче по спутниковым каналам сетей непосредственного вещания (DTH). Стандарт DVB-DSNG, появившийся на три года позже, выполняет те же задачи для профессиональных сетей, то есть для сетей передачи сигнала на пункты ретрансляции и спутниковых сетей сбора новостей. Второй стандарт отличается от первого, в основном тем, что рассчитан на более слабые



передатчики, не вводящие спутниковый ретранслятор в режим насыщения и поэтому допускающие использование более высоких уровней модуляции – 8PSK и 16QAM.

### Система высокоскоростного цифрового спутникового ТВ-вещания DVB-S2

DVB-S2 призван покрыть обе эти области, а также должен решить ряд задач, с которыми имеющиеся стандарты справляются плохо.

#### Схемы модуляции и способы помехозащитного кодирования

Новый стандарт предусматривает четыре возможных схемы модуляции (рис

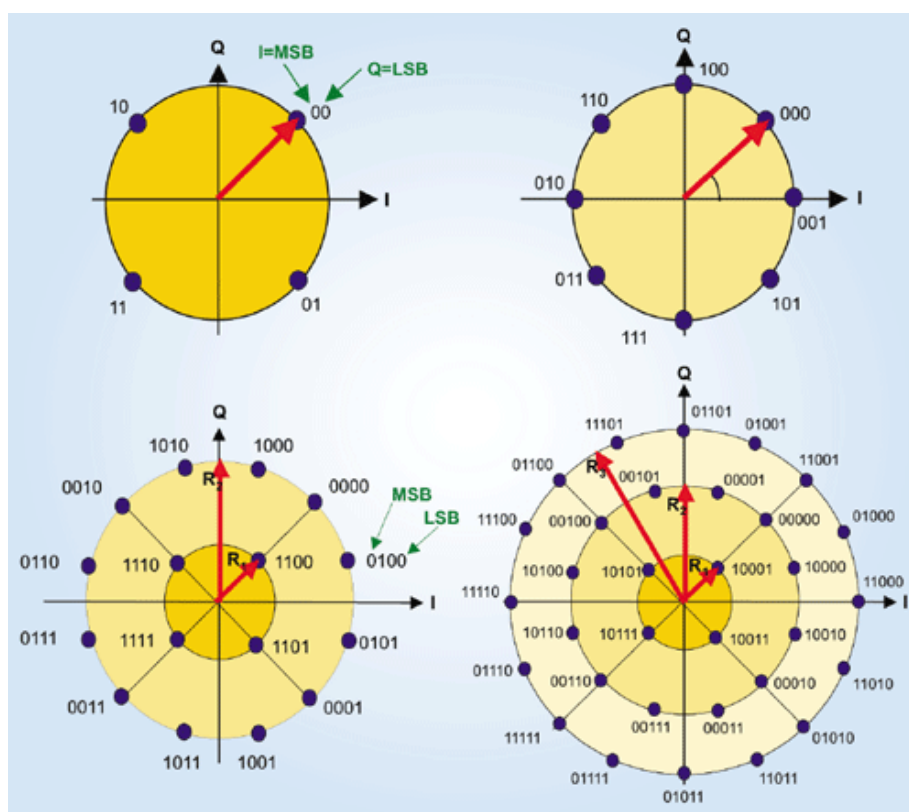


Рис. 5.155. Четыре схемы модуляции, применяемых в стандарте DVB-S2:

QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK

Первые две, QPSK и 8PSK, предназначены для использования в вещательных сетях. Передатчики транспондеров работают там в режиме, близкому к насыщению, что не позволяет модулировать несущую по амплитуде. Более скоростные схемы модуляции, 16 APSK и 32 APSK, ориентированы на профессиональные сети, где часто используются более слабые наземные передатчики, не вводящие бортовые ретрансляторы в нелинейный режим работы, а на приемной стороне устанавливаются профессиональные конвертеры (LNB), позволяющие с высокой точностью оценить фазу принимаемого сигнала. Эти схемы модуляции можно использовать и в системах

вещания, но этом случае каналообразующее оборудование должно поддерживать сложные варианты предусказаний, а на приемной стороне должен быть обеспечен более высокий уровень отношения сигнал/шум.

### Практическая часть индивидуального задания [25]

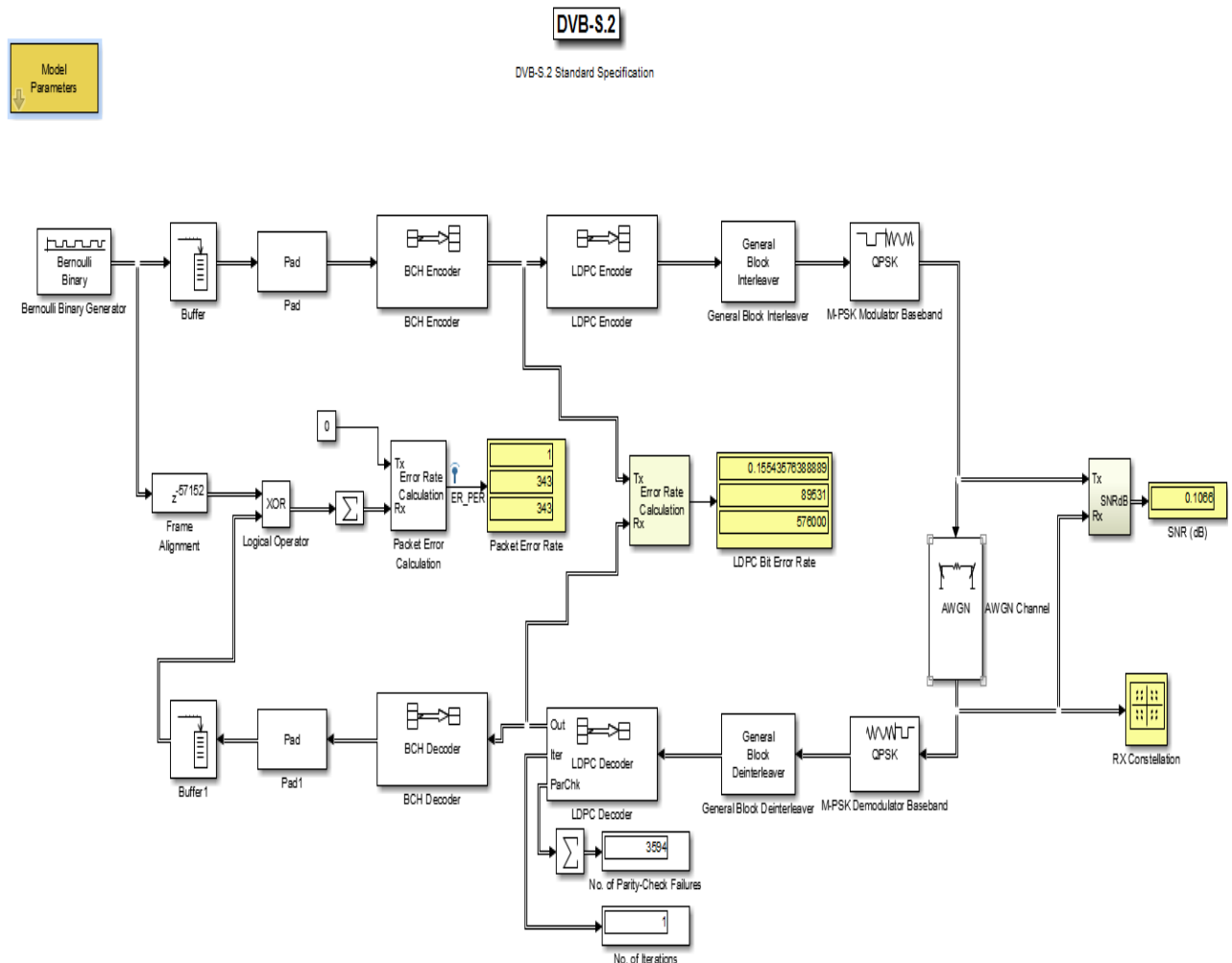


Рис. 5.156. Структура DVB-S2 в Simulink MATLAB 2015b

Структура модема и кодека DVB-S2 состоит из следующих модулей:

1. **Bernoulli sequence generator** - Первый блок отвечает за генерацию сбалансированных, с точки зрения вероятности инцидентов, случайной двоичной последовательности. Последовательность Бернулли распределена нулей и единиц вероятностями  $p$  и  $(1-p)$  соответственно. В этой модели,  $p = 0,5$  в результате равной вероятности происходит за 0 и 1. Выходной сигнал этого блока является основой для размера пакета MPEG-TS, который содержит 188 байт по 8 бит, то есть 1504 бит.

2. **BBFRAME buffering/unbuffering**. С выхода генератора пакеты буферизуются, создавая базовый диапазон кадра (BBFRAME). Размер этого кадра зависит от

скорости кодирования, чтобы ВСН был равен размерам входного сигнала, на входе кодера. Информационные биты (DFL) может быть рассчитана по формуле:

$$\text{DataField} = K_{\text{ВСН}} - 80$$

Где  $K_{\text{ВСН}}$  является размер внешнего блока FEC кодера ВСН, и размер заголовка равен 80 ВВFrame. Структура ВВFRAME показана на рисунке 4.24

3. ВСН encoder/decoder - Одним из DVB-S2 достижений является прямое исправление ошибок, которые развернуты, чтобы уменьшить BER в передаче используется исправление ошибок ВСН. Выход ВВFrame буферизации блока на стороне отправителя, являются кадры бит, где ВСН исправление ошибок с исправлением власти  $t$  будет применяться к ним. Для каждого из 11 скорости кодирования представлены в стандартных значений  $K_{\text{всн}}$  и  $n_{\text{МПБ}}$  определяются в том числе  $T$ -коррекции ошибок параметра. В таблицах 1 и 2 эти значения приведены для нормальных и коротких кадров, соответственно.

4. LDPC encoder/coder – Кодирование с проверкой четности. Отношение в скорости показывает, на сколько бит информации сколько приходится бит с проверкой четности. Например  $1/4$  имеет высокую степень проверки четности, и малую скорость, а  $9/10$  высокую скорость, но слабую проверку на четность. На стороне приемника, LDPC-декодер проверяет принятую последовательность до проверки четности

## Ход работы

Вид модуляции Qpsk 1/4

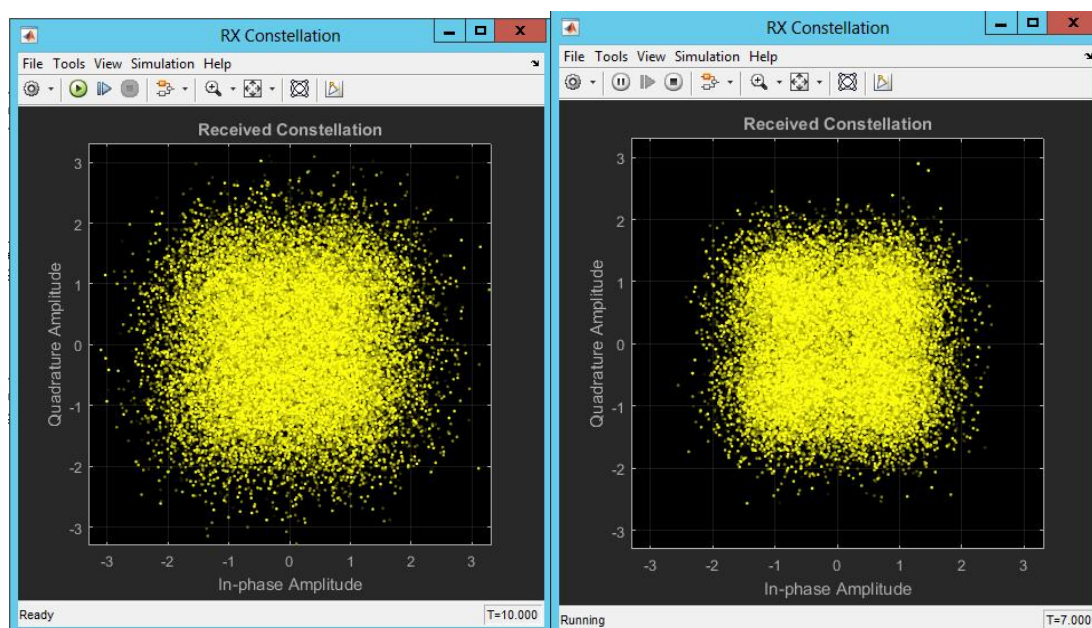


Рис. 5.157. Созвездие при  $E_b/N_0 = 0.5$  и  $E_b/N_0 = 3.5$

Вид модуляции Qpsk  $3/4$

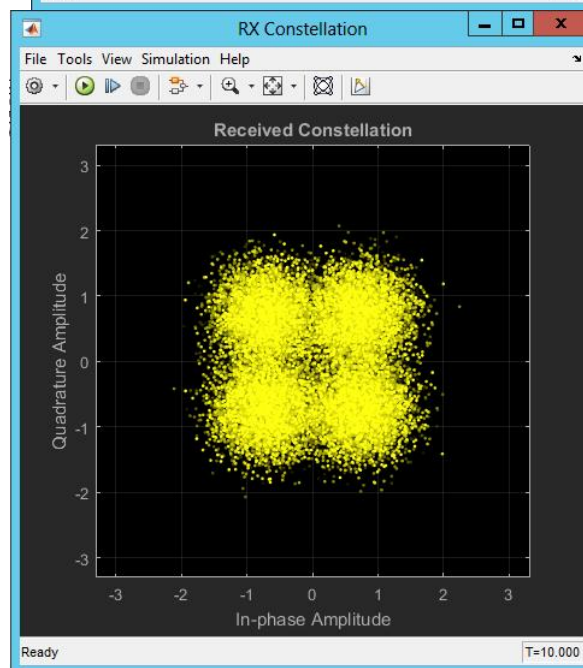
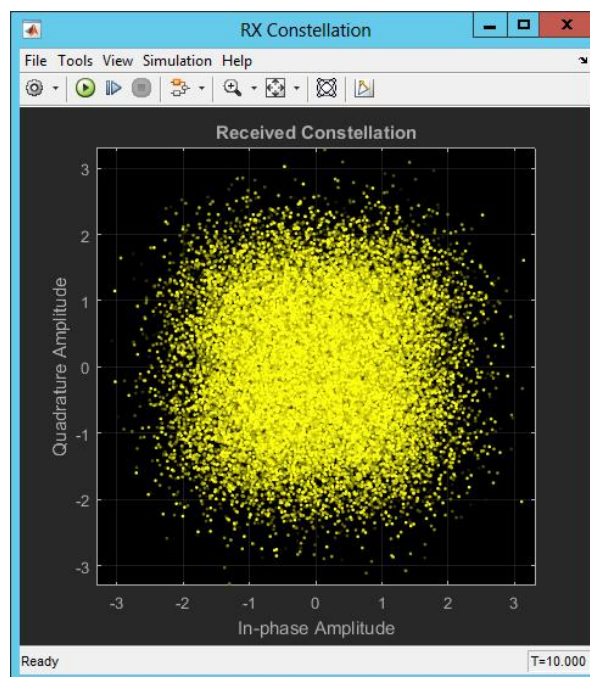


Рис. 5.158. Созвездие при  $E_b/N_0 = 0,5$  и  $E_b/N_0 = 5$

Вид модуляции - 8psk

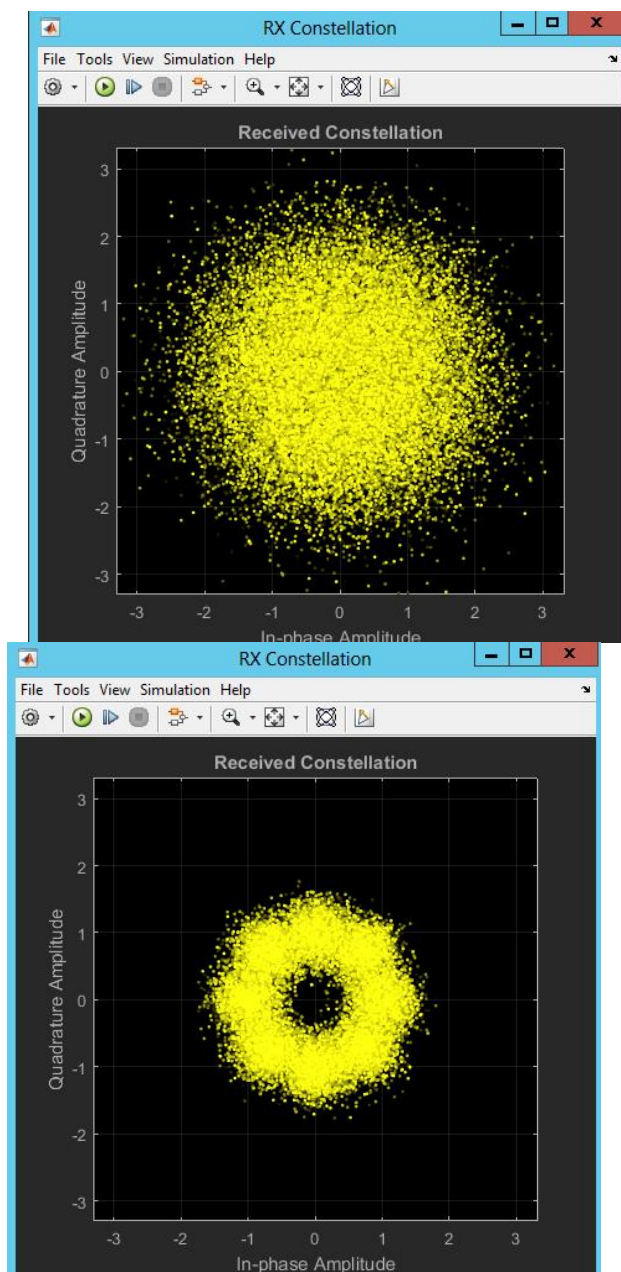


Рис. 5.159. Созвездие  $E_b/N_0 = 0,5$  и  $E_b/N_0 = 12$

Вид модуляции - 8psk9/10

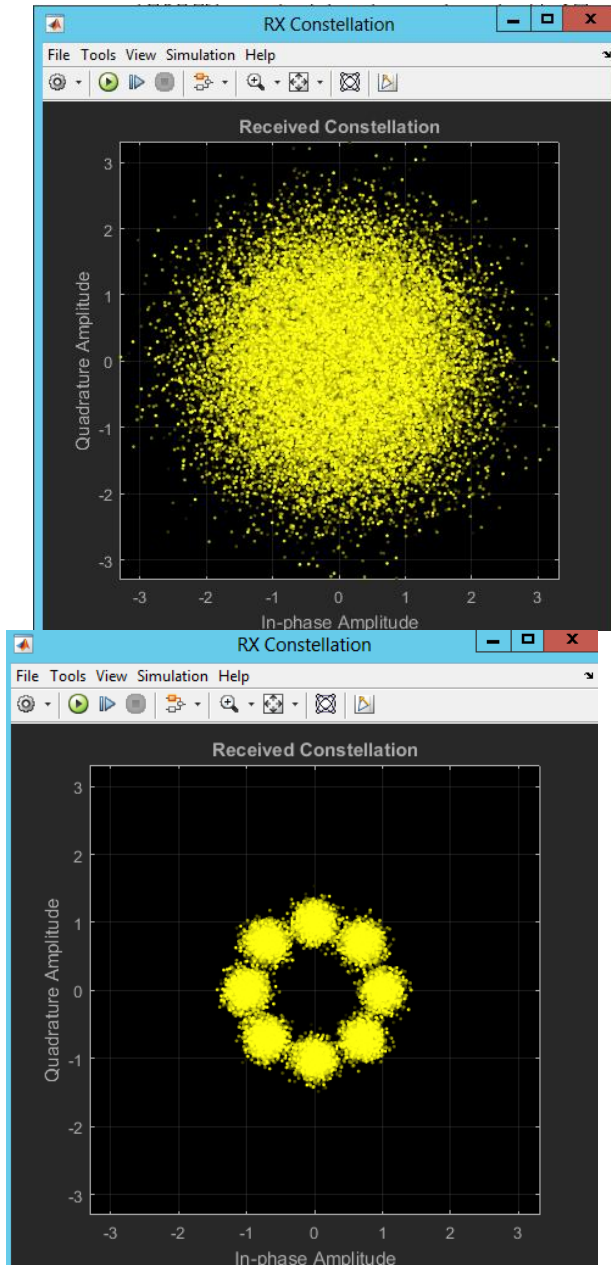


Рис. 5.160. Созвездие при  $E_b/N_0 = 0.5$  и  $E_b/N_0 = 6$



График зависимости  $E_b/N_0$  от BER

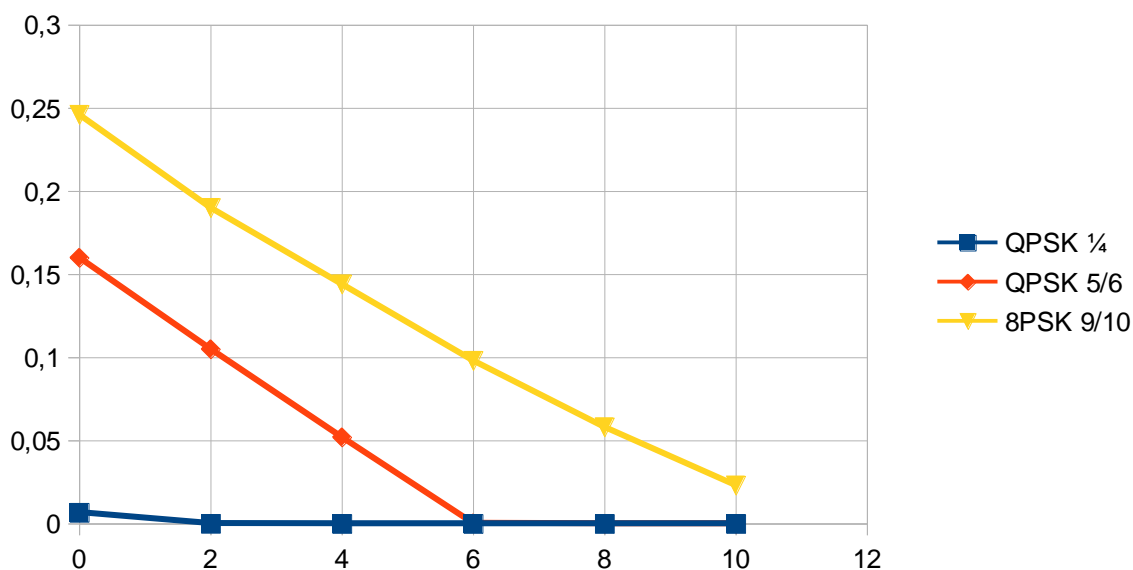


Рис. 5.161. График зависимости BER от  $E_b/N_0$

В ходе работы был изучен алгоритм стандарта DVB-S2, создан его рабочий макет, позволяющий увидеть получаемые созвездия, увидеть разность появляющихся ошибок при передаче на разных скоростях. Стандарт DVB-S2 являлся промежуточным звеном между DVB-S и DVB-C2, и не был реализован в полной мере, по сравнению с форматом DVB-S.

### 5.10. Проектирование защищенной системы цифрового кабельного телевизионного вещания DVB-C и системы высокоскоростного цифрового кабельного ТВ-вещания DVB-C2 [17, 25]

DVB-C – стандарт цифрового телевизионного вещания, который производится по кабелю. В основе стандартов DVB-C лежит стандарт кодирования движущихся изображений и звукового сопровождения MPEG-2.

#### Система цифрового кабельного телевизионного вещания DVB-C.

Система цифрового кабельного телевидения определяется как функциональный блок оборудования, выполняющий адаптацию ТВ-сигналов к характеристикам кабельного канала. Система DVB-C максимально гармонизирована со спутниковой системой DVB-S и может использовать источник местных ТВ-программ.

В связи с высокой помехозащищенностью кабельных каналов связи в системе DVB-C не используется сверточное кодирование, но применяется многопозиционная QAM-модуляция — от 16-QAM до 256-QAM.

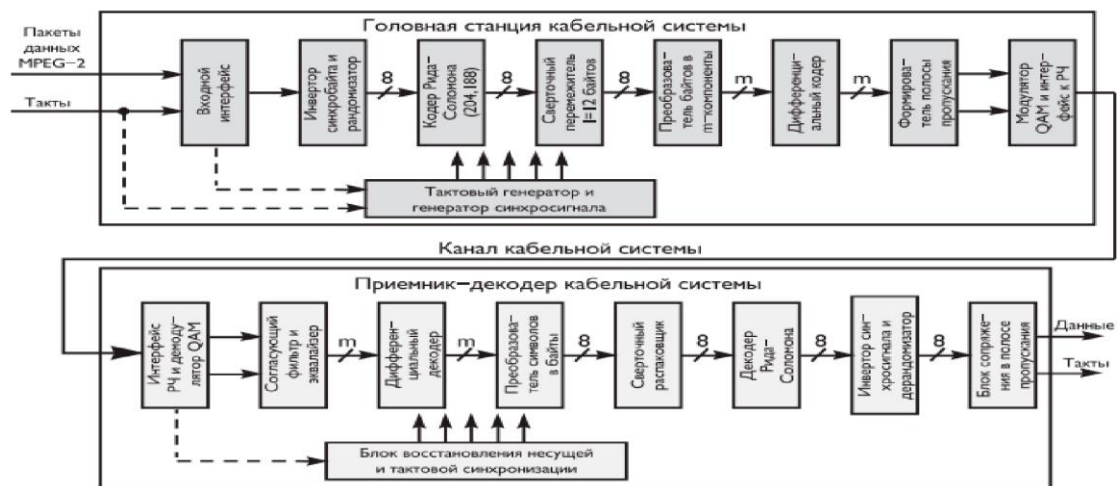


Рис. 5.162. Структурная схема системы цифрового кабельного телевидения DVB-C

В качестве входных сигналов на головной станции используются транспортные пакеты MPEG-2, поступающие через входной интерфейс на модуль, и рандомизирующий поток поступающих данных. Схема рандомизатора/дерандомизатора аналогична используемой в стандарте DVB-T.

Вслед за процессом рандомизации распределения энергии выполняется систематическое сокращенное кодирование Рида-Соломона каждого рандомизированного транспортного пакета MPEG-2, при  $t = 8$ , что обеспечивает возможность корректировки 8 ошибочных байтов в каждом транспортном пакете. Данный процесс добавляет 16 байтов четности к транспортному пакету MPEG-2 для получения кодового слова (204, 188).

Затем следует сверточный перемежитель состоящий из  $l = 12$  звеньев, циклически присоединенных к входному потоку байтов с помощью коммутатора. Каждое звено представляет собой регистр FIFO размером  $M \cdot j$  ячеек ( $M = 17 = N/l$ ,  $N = 204$  — длина защищенного от ошибок кадра,  $l = 12$  — глубина перемежения,  $j$  — индекс звена). Ячейки FIFO содержат 1 байт, а работа коммутаторов входа и выхода синхронизирована. При этом неинвертированные и инвертированные синхронизирующие байты должны быть всегда адресованы в нулевое звено компоновщика, соответствующее нулевой задержке.

После сверточного перемежения производится точное перекодирование байтов в символы. Перекодирование должно быть основано на использовании границ байтов в системе модуляции. Длина символов  $m = \log_2 M$ , где  $M$  — число позиций QAM-созвездия. Циклическая задача отображения для одного цикла определяется соотношением:

$$8k = n \cdot m, \quad (1)$$

где  $k$  и  $n$  — числа преобразуемых байтов и последовательности двоичных символов, соответственно (см. табл. 5.5.).



Коэффициенты преобразования байтов в последовательности символов.

Модуляция	$m$	$n$	$k$	$8k$
16-QAM	4	2	1	8
32-QAM	5	8	5	40
64-QAM	6	4	3	24
128-QAM	7	8	7	56
256-QAM	8	1	1	8

Для устранения потерь из-за скачков фазы несущей применяется дифференциальное кодирование двух старших битов ( $A_k$  и  $B_k$ ) последовательности символов. Эти два старших бит каждого символа должны быть дифференциально закодированы для получения инвариантного относительно фазового сдвига на  $\pi/2$  созвездия QAM. Дифференциальное кодирование двух старших битов (MSB) должно осуществляться согласно следующему Булеву выражению:

$$I_k = \overline{(A_k \oplus B_k)} \cdot (A_k \oplus I_{k-1}) \vee (A_k \oplus B_k) \cdot (A_k \oplus Q_{k-1});$$

$$Q_k = \overline{(A_k \oplus B_k)} \cdot (A_k \oplus Q_{k-1}) \vee (A_k \oplus B_k) \cdot (A_k \oplus I_{k-1}).$$

На рис. 5.197. приведен пример реализации преобразования байтов в символы.

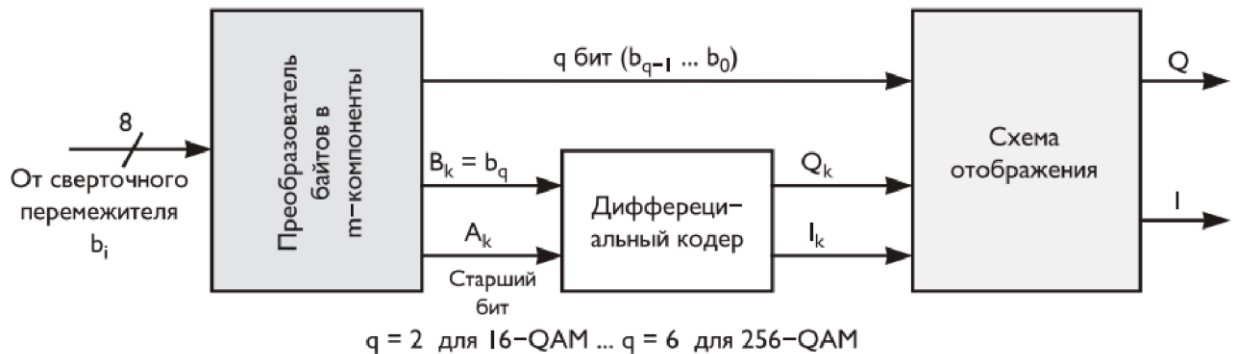


Рис. 5.163. Пример реализации преобразования байта в  $m$ -мерный вектор и дифференциального кодирования двух старших битов

Квадратурные сигналы  $I$  и  $Q$  с выхода схемы отображения перед модуляцией подвергаются фильтрации с помощью фильтра, характеристика которого соответствует соотношению при коэффициенте  $\alpha = 0,15$ .

В табл. 2 приведены примеры расчетных значений символьной и информационной скоростей при разных кратностях модуляции в канале с полосой 8 МГц. Максимальная скорость достигает 38,1 Мбит/с, что соответствует пропускной способности ствола спутникового ретранслятора с полосой 33 МГц в типовом режиме  $F_{\text{симв}} = 27,5$  Мсим/с,  $R = 3/4$ .

Примеры расчетных значений символьной и информационной скоростей при использовании стандарта DVB-C.

Полезная информационная скорость (транспортный уровень MPEG-2), Мбит/с	Общая скорость, включая RS (204,188), Мбит/с	Кабельная символьная скорость, Мбод/с	Занимаемая полоса частот, МГц	Вид модуляции
38,1	41,34	6,89	7,92	64-QAM
31,9	34,61	6,92	7,96	32-QAM
25,3	27,34	6,84	7,86	16-QAM
18,9	20,52	3,42	3,93	64-QAM
16,0	17,40	3,48	4,00	32-QAM
12,8	13,92	3,48	4,00	16-QAM
9,6	10,44	1,74	2,00	64-QAM
8,0	8,70	1,74	2,00	32-QAM
6,4	6,96	1,74	2,00	16-QAM

### **Система высокоскоростного цифрового кабельного телевизионного вещания DVB-C2.**

Стандарт кабельного цифрового телевизионного вещания DVB-C2 максимально унифицирован с новыми стандартами, обслуживающими спутниковую (DVB-S2) и эфирную (DVB-T2) транспортные среды.

На рис. 3 а–г приводится достаточно подробная структурная схема передающей части DVB-C2. Как в DVB-S2 и DVB-T2, в новом кабельном стандарте внутри одного физического канала предусмотрено выделение транспортных PLP физических каналов, которые могут обрабатывать и переносить обычный поток MPEG-2 TS или использоваться для передачи IP с применением GSE-протокола.

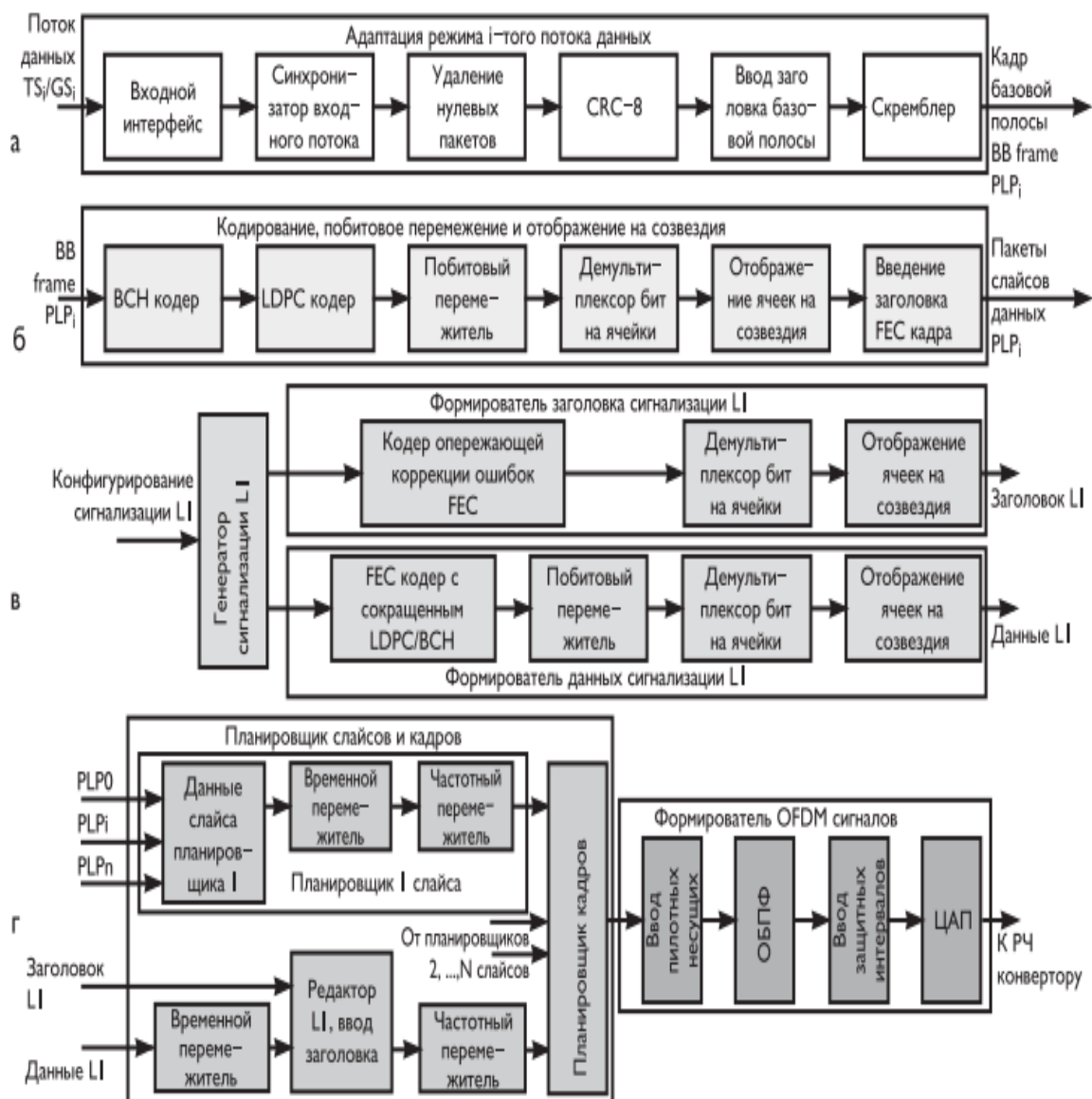


Рис. 5.164. Структурная схема передающей части системы DVB-C2

Вход системы DVB-C2 состоит из одного или из множества логических потоков данных. По одной магистрали физического уровня (PLP) передается один логический поток данных. Модули адаптации режима, по отдельности обрабатывающие содержимое каждой PLP, разбивают входной поток данных на поля данных, которые после адаптации потока должны сформировать кадры базовой полосы (BBFrame). Модуль адаптации режима включает в себя входной интерфейс, за которым следуют три опциональные подсистемы (синхронизатор входного потока, модуль удаления нулевых пакетов и кодер CRC-8), после которых он разбивает входной поток данных на поля данных и выполняет вставку заголовка базовой полосы (BBHeader) в начале каждого поля данных. Подсистема входного интерфейса обеспечивает преобразование входного сигнала во внутренний логически-битовый формат для каждой единичной магистрали физического уровня (PLP, рис.3а). Длина поля данных DFL на выходе интерфейса должна находиться в пределах:  $0 < DFL < (K_{bch} - 80)$ , где  $K_{bch}$  — количество битов в поле данных, защищенном кодами BCH и LDPC;

10-байтовый (80 битов) заголовок BBHeader присоединяется к началу поля данных и также защищен кодами LDPC и BCH.

Синхронизатор входного потока формирует поле, состоящее из 2 или 3 байтов (поле ISSY - Input Stream Synchronisation), в котором передается значение счетчика, тактируемого с тактовой частотой модулятора ( $1/T$ , где  $T = 7/64$  мкс или  $T = 7/48$  мкс для каналов с полосой пропускания 8 МГц или 6 МГц, соответственно), используемого приемником для восстановления точной синхронизации восстановленного выходного потока. Содержание поля ISSY зависит от формата входного потока и режимов обычной или повышенной эффективности, указанных в заголовке базовой полосы.

Установленные для передачи транспортных потоков требования предусматривают, чтобы скорости битовых потоков на выходе мультиплексора передатчиков и на входе демultipлексора приемников были постоянными на протяжении длительных периодов времени и сквозная задержка также была постоянной. Во входных транспортных потоках может присутствовать большая доля нулевых пакетов для адаптации сервисов с переменной скоростью битового потока в транспортных потоках с постоянной скоростью. В таком случае, во избежание излишних накладных расходов при передаче, нулевые пакеты TS должны быть удалены. Процесс выполняется таким образом, чтобы удаленные нулевые пакеты могли быть повторно вставлены в приемнике в точности на то же самое место, где они находились первоначально.

Кодирование CRC-8, как и в системах DVB-T2 и DVB-S2, применяется для детектирования ошибок на уровне пользовательского пакета, а 10-байтовый заголовок базовой полосы (BBHeader) фиксированного размера вводится перед полем данных для описания формата поля данных.

Перед поступлением на вход системы помехоустойчивого кодирования (см. рис.3б) цифровой поток базовой полосы скремблируется сдвиговым регистром с обратной связью. Порождающий полином последовательности PRBS —  $1 + x^{14} + x^{15}$  — с иницируемой в начале каждого кадра BBFrame загрузкой в регистр кода 100101010000000.

Структура формата кадра с опережающей коррекцией ошибок BCH и LDPC для основного размера 64 800 битов и сокращенного размера 16 200 битов могут быть для LDPC кодов — 2/3, 3/4, 4/5, 5/6 и 9/1 и для LDPC кодов — 1/2, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6 и 8/9, соответственно.

Сигнал с выхода кодера LDPC подвергается побитовому перемежению, которое состоит из перемежения проверочных битов, за ним следует перемежение со сдвигом начала столбцов в соответствии с правилом системы DVB-C2 (информационные биты не перемежаются). Значения параметра Qldpc определены в табл. 5.7.

Значения  $N_{\text{ldpc}}$  для основных и сокращенных кадров.

Скорость кода	$N_{\text{ldpc}} = 64\ 800$	$N_{\text{ldpc}} = 16\ 200$
1/2	–	25
2/3	60	15
3/4	45	12
4/5	36	10
5/6	30	8
8/9	–	5
9/10	18	–

Структура побитового перемежителя

Модуляция	Строки $N_r$		Столбцы $N_c$
	$N_{\text{ldpc}} = 64\ 800$	$N_{\text{ldpc}} = 16\ 200$	
16-QAM	8100	2025	8
64-QAM	5400	1350	12
256-QAM	4050	–	16
	–	2025	8
1024-QAM	3240	810	20
4096-QAM	5400	–	12
	–	675	24

При перемежении со сдвигом начала столбцов биты данных  $u_i$  с перемежителя проверочных битов последовательно записываются в перемежитель со сдвигом начала столбцов по столбцам, и последовательно считываются по строкам (старший бит заголовка считывается первым). Запись стартовой позиции каждого столбца сдвигается на величину  $t_c$  в соответствии с табл. 5.9.

Модуляция	16-QAM		64-QAM		256-QAM		1024-QAM		4096-QAM	
$N_{ldpc}$	64 800	16 200	64 800	16 200	64 800	16 200	64 800	16 200	64 800	16 200
Столбцы $N_c$	8		12		16	8	20		12	24
Сдвиг $t_c$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0
	2	2	0	2	0	2	0	3	0	2
	3	4	1	2	2	2	1	4	2	2
	4	4	7	3	2	2	7	5	2	3
	5	5	20	4	2	3	20	6	2	4
	6	7	20	4	3	7	20	6	2	4
	7	7	21	5	3	15	21	9	2	5
	8	–	–	5	3	16	–	13	5	5
	9	–	–	7	6	20	–	14	5	7
	10	–	–	8	7	22	–	14	5	8
	11	–	–	9	7	22	–	16	5	9
	12	–	–	–	–	27	–	21	5	–
	13	–	–	–	–	27	–	21	7	–
	14	–	–	–	–	28	–	23	7	–
	15	–	–	–	–	32	–	25	7	–
	16	–	–	–	–	–	–	25	7	–
	17							26	8	–
	18							28	8	–
	19							30	10	–
	20									10
	21									10
	22									10
	23									11

Каждый кадр FECFRAME преобразовывается в кодированный и модулированный FEC блок с опережающей коррекцией ошибок. Для этого входные биты сначала демультиплексируются на параллельные модулирующие значения ячеек, и затем эти модулирующие значения отображаются на значения созвездия. Количество ячеек выходных данных и эффективное количество битов на ячейку  $\eta_{mod}$  заданы в табл. 4.10.

Параметры побитового отображения на созвездия.

Длина блока LDPC-кода ( $N_{ldpc}$ )	Режим модуляции	$\eta_{mod}$	Число выходных ячеек данных
64 800	4096-QAM	12	5400
	1024-QAM	10	6480
	256-QAM	8	8100
	64-QAM	6	10 800
	16-QAM	4	16 200
16 200	4096-QAM	12	1350
	1024-QAM	10	1620
	256-QAM	8	2025
	64-QAM	6	2700
	16-QAM	4	4050
	QPSK	2	8100

Битовый поток  $v_{di}$ , от побитового перемежителя демультиплексируется на  $N_{substreams}$  подпотоков.

Количество подпотоков в демультимплексоре.

Модуляция	$N_{\text{dps}}$	Количество подпотоков $N_{\text{substreams}}$
QPSK	Любое	2
16-QAM	Любое	8
64-QAM	Любое	12
256-QAM	64 800	16
	16 200	8
1024-QAM	Любое	20
4096-QAM	64 800	12
	16 200	24

Демультимплексирование определяется как отображение подвергнутых побитовому перемежению входных битов,  $v_{di}$ , на выходные биты  $b_{e,do}$  на выходе демультимплексора  $d_i \bmod N_{\text{substreams}}$  — число входных битов;  $d_o = d_i \div N_{\text{substreams}}$  — число битов в заданном потоке на выходе демультимплексора;  $e$  — количество демультимплексированных битовых потоков, ( $0 < e < N_{\text{substreams}}$ ), зависящее от  $d_i$ ).

Каждое модулирующее значение ячеек, поступающее от демультимплексора, модулируется с использованием созвездий одного из типов: QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM или 4096-QAM. Созвездия и детализация применяемого к ним отображения реализуются в соответствии с кодом Грея.

Точки созвездий  $z_q$  для каждого входного модулирующего значения ячеек  $[y_{0,q} \dots y_{q \bmod -1,q}]$  нормализуются .

Параметры демультимплексирования битов на подпотоки для всех кодовых скоростей (за исключением 2/3)

QPSK																									
Вход	0 1																								
Выход	0 1																								
16-QAM																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7																								
Выход	7 1 4 2 5 3 6 0																								
64-QAM																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11																								
Выход	11 7 3 10 6 2 9 5 1 8 4 0																								
256-QAM ( $N_{\text{Idpc}} = 64\ 800$ )																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15																								
Выход	7 2 9 0 4 6 13 3 14 10 15 5 8 12 11 1																								
256-QAM ( $N_{\text{Idpc}} = 16\ 200$ )																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7																								
Выход	7 3 1 5 2 6 4 0																								
1024-QAM ( $N_{\text{Idpc}} = 64\ 800$ )																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19																								
Выход	8 16 7 19 4 15 3 12 0 11 10 9 13 2 14 5 17 6 18 1																								
1024-QAM ( $N_{\text{Idpc}} = 16\ 200$ )																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19																								
Выход	8 3 7 10 19 4 9 5 17 6 14 11 2 18 16 15 0 1 13 12																								
4096-QAM ( $N_{\text{Idpc}} = 64\ 800$ )																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11																								
Выход	8 0 6 1 4 5 2 3 7 10 11 9																								
4096-QAM ( $N_{\text{Idpc}} = 64\ 800$ )																									
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23																								
Выход	8 0 6 1 4 5 2 3 7 10 11 9 6 17 13 20 1 3 9 2 7 8 12 0																								

Нормирующие множители для ячеек данных.

Модуляция	Нормирующие множители
QPSK	$f_q = z_q / \sqrt{2}$
16-QAM	$f_q = z_q / \sqrt{10}$
64-QAM	$f_q = z_q / \sqrt{42}$
256-QAM	$f_q = z_q / \sqrt{170}$
1024-QAM	$f_q = z_q / \sqrt{682}$
4096-QAM	$f_q = z_q / \sqrt{2730}$

На рис. 5.165 Структура датчиков сигнала синхронизации кадров DVB - C2, содержащего два канал — формирователей заголовка и данных сигнализации L1 . Кодирование заголовка сигнализации L1 осуществляется первоначально с помощью кодера Рида – Маллера (32, 16). При этом каждый бит 32-битового кодового слова Рида–Маллера разбивается на две ветви. Затем данные отображаются на созвездие QPSK для устойчивого к ошибкам заголовка кадров FECFrame, или на созвездие 16-QAM для заголовка кадров FECFrame с повышенной эффективностью.



Данные сигнализации L1 подвергаются сокращенному LDPC/VCH – кодированию с последующим побитовым перемежением, демультиплексированием и 16-QAM модуляцией.

На рис. 5.166г изображена структура планировщика слайсов, формирователя кадров и OFDM-сигналов системы DVB-C2.

Один или множество логических каналов PLP организуются в группу PLP, и одна или множество таких групп PLP образуют слайс данных. Система C2 может состоять из одного или множества слайсов данных. Предполагается, что приемник всегда должен иметь возможность принимать одну PLP-данных и связанную с ней общую PLP при ее наличии.

Для канала с шириной полосы 8 МГц максимальное число OFDM-несущих при передаче каждого слайса должно быть не более  $n_{KDCmax} - KDCmin \leq 3408$  при  $f_{max} - f_{min} = 7,61$  МГц и длительности символа  $TU = 448$  мкс.

Данные слайса от каждого планировщика подвергаются временному и частотному перемежению. Временной перемежитель обычно содержит два банка памяти, в первый из которых осуществляется запись, а из второго производится считывание данных слайса, затем производится переключение режимов работы этих банков. Для реализации частотного перемежения производится изменение порядка считывания символов звездной диаграммы. Данные от планировщиков слайсов поступают на планировщик кадров, на который подаются также специальным образом обработанные данные синхронизации L1.

Структура кадра системы DVB-C2 поясняется рис. 5.166а.

Преамбула кадра включает LP символов (LP1), за ней следует LData символов данных. Преамбула несет информацию о символах блока синхронизации L1 (3408 поднесущих частот в полосе 7,71 МГц). Данные слайсов могут передаваться в произвольной полосе частот, не превышающей полосу частот передачи символов блока L1. Неиспользуемые частоты могут занимать часть всего кадра DVB-C2.

Данные сигнализации L1 циклически повторяются, что обеспечивает возможность восстановить полный L1 блок из частей двух блоков, как показано на рис. 5.199б. На входе формирователя OFDM-сигналов установлена схема ввода пилотных несущих, в состав которых входят пилотные несущие преамбулы, постоянные и рассеянные пилотные несущие в составе передаваемых символов данных, а также граничные пилотные несущие, несущие информацию о границах передачи символов данных.

Номера пилотных несущих преамбулы связаны соотношением:  $k \bmod DP = 0$ , (2) где  $DP = 6$ , т. е. эти пилотные несущие соответствуют значениям  $k = 0, 6, 12, \dots, 3402$ . Параметры пилотных несущих определены следующим образом:

$$\operatorname{Re}\{c_{m,l_P,k}^P\} = A_{PP} \cdot 2(1/2 - r_k), \quad \operatorname{Im}\{c_{m,l_P,k}^P\} = 0,$$

где  $A_{PP} = 1$ ,  $m$  — номер кадра,  $l_P$  — номер символа преамбулы,  $k$  — индекс несущей, а  $r_k$  определено только для значений  $k$ , кратных 6, и вычисляется по формуле:

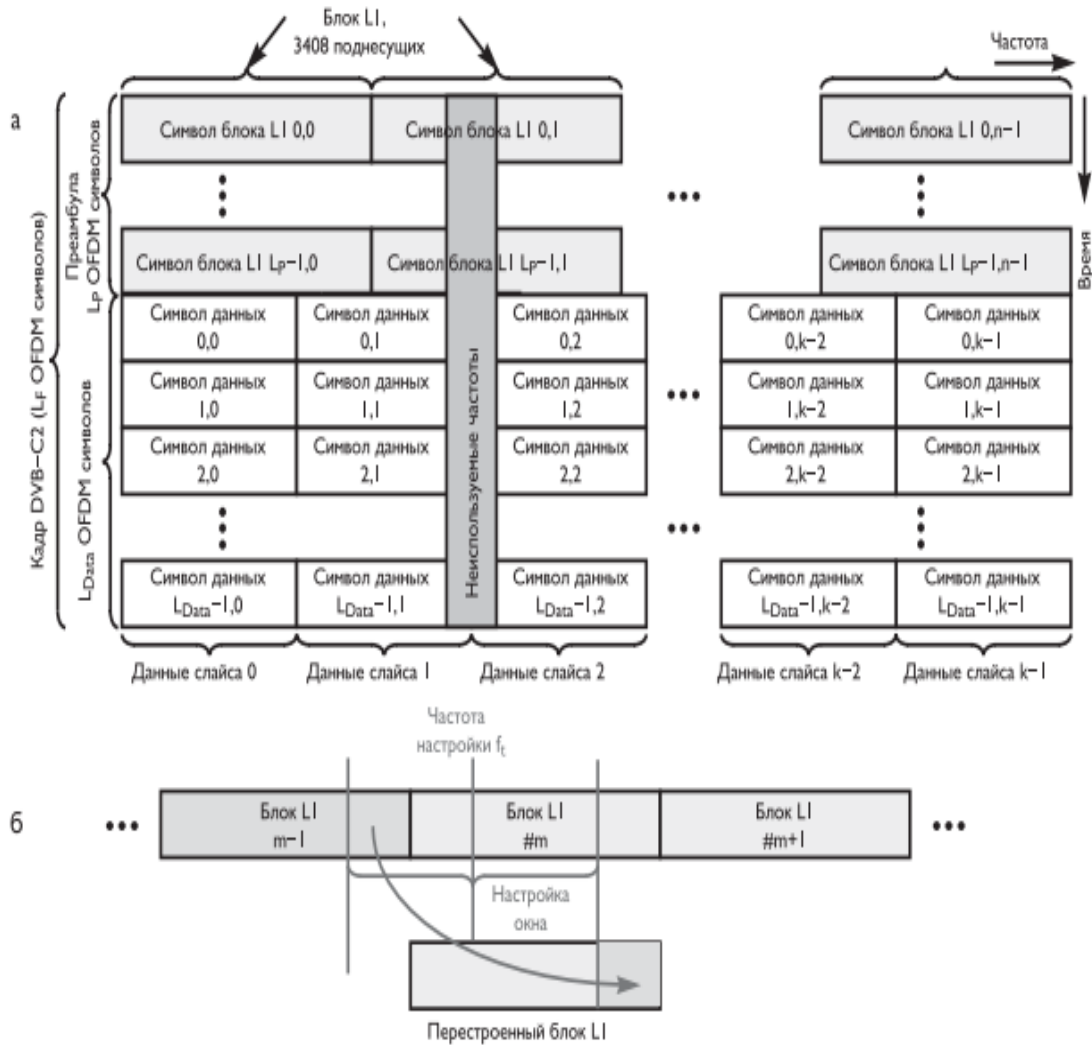


Рис. 5.166. Структура кадра системы DVB-C2.

$$r_k = \begin{cases} w_k^P, & k \bmod K_{L1} = 0; \\ r_{k-6} \oplus w_k^P, & \text{иначе;} \end{cases} \quad w_k^P = w_k \oplus w'_i, i = (k \bmod K_{L1})/D_P;$$

$w_i$  — PRBS регистра сдвига, определяемого соотношением  $x^{10} + x^3 + 1$ , иницируемого последовательностью единиц, т. е.  $w_0, w_1, w_2, \dots = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, \dots$ ;  $w_k$  — PRBS регистра сдвига, определяемого соотношением  $x^{11} + x^2 + 1$ , иницируемого последовательностью единиц, т. е.  $w_0, w_1, w_2, \dots = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, \dots$ . Номера локальных рассеянных пилотных несущих определяются следующим соотношением:

$$k \bmod (D_X \cdot D_Y) = D_X \cdot (l \bmod D_Y),$$

где  $k$  — индекс несущей,  $l$  — индекс символа данных,  $D_X$ ,  $D_Y$  определены в табл. 5.24.

Кроме рассеянных пилотных несущих в каждый символ кадра, за исключением преамбулы, вводятся постоянные несущие. Индексы этих несущих локально в пределах блока из  $KL1 = 3408$

Индексы постоянных пилотных несущих.

96	216	306	390	450	486	780	804
924	1026	1224	1422	1554	1620	1680	1902
1956	2016	2142	2220	2310	2424	2466	2736
3048	3126	3156	3228	3294	3366		

В дополнение к рассеянным и постоянным пилотным несущим вводятся также граничные пилотные несущие, определяющие «края» в каждом символе. Такие пилотные несущие вводятся также на границах областей неиспользуемых частот. Некоторые OFDM-ячейки могут быть зарезервированы для подавления пиковых значений формируемого радиосигнала (PAPR). Резервируемые ячейки OFDM-сигнала  $S_0$  определяются соотношением:  $[k \bmod (8 \cdot KL1)] - D_x (l \bmod D_Y) \in S_0, 0 \leq l < L_{Data}$ , где  $k$  — абсолютный индекс несущей,  $L_{Data}$  — количество символов данных в кадре DVB-C2. Формируемый на выходе ОБПФ-сигнал может быть записан в следующем виде:

$$s(t) = Re \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{\sqrt{K_{total}}} \sum_{l=0}^{L_F-1} \sum_{k=K_{min}}^{K_{max}} c_{m,l,k} \cdot \psi_{m,l,k}(t) \right] \right\},$$

где

$$\psi_{m,l,k}(t) = \begin{cases} \exp \left[ 2\pi j \frac{k}{T_U} (t - T_G - lT_S - mT_F) \right] & \text{при } mT_F + lT_S \leq t \leq \\ & \leq mT_F + (l+1)T_S; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

$k$  — номер поднесущей;  $l$  — номер символа OFDM от «0» до первого символа преамбулы кадра;  $m$  — номер кадра DVB-C2;  $K_{total}$  — количество используемых несущих,  $K_{max} - K_{min}$ ;  $L_F$  — количество OFDM символов в кадре (исключая преамбулу);  $T_U$  — длительность активной части символа;  $T_G$  — длительность защитного интервала;  $T_{STU} + T_G$  — полная длительность символа;  $c_{m,l,k}$  — комплексное значение  $k$ -й несущей в  $l$ -м OFDM-символе  $m$ -го кадра DVB-C2;  $T_{LFTS}$  — длительность кадра;  $K_{min}$  и  $K_{max}$  — индексы первой нижней и последней верхней активных несущих, соответственно.

Поскольку в системе DVB-C2 применены более эффективные методы помехоустойчивого кодирования по сравнению с системой DVB-C, возможно

использование звездных диаграмм OFDM-сигналов более высокой размерности. Допустимые комбинации модуляций и параметров LDPC-кодирования приведены в табл. 5.26, в которой также указаны величины отношения сигнал/шум, требуемые для приема, квазисвободного от ошибок.

Параметры OFDM-сигналов для каналов с полосой пропускания 6 МГц и 8 МГц.

Параметр	6 МГц 1/64	6 МГц 1/128	8 МГц 1/64	8 МГц 1/128
Количество OFDM-несущих в блоке сигнализации $L1 - K_{L1}$	3408	3408	3408	3408
Ширина полосы блока сигнализации $L1$	5,61 МГц	5,61 МГц	7,61 МГц	7,61 МГц
Длительность $T_U$ в элементарных периодах $T$	$4096T$	$4096T$	$4096T$	$4096T$
Длительность $T_U$ в мкс	597,3	597,3	448	448
Частотный интервал между несущими $1/T_U$ в Гц	1674	1674	2232	2232
Длительность $T_G$ в элементарных периодах $T$	$64T$	$32T$	$64T$	$32T$
Длительность $T_G$ в мкс	9,33	4,66	7	3,5

Отношение сигнал/шум при различных параметрах системы DVB-C2.

Параметры LDPC кода	16-QAM	64-QAM	256-QAM	1024-QAM	4096-QAM
2/3	–	13,5 дБ	–	–	–
3/4	–	–	20,0 дБ	24,8 дБ	–
4/5	10,7 дБ	16,1 дБ	–	–	–
5/6	–	–	22,0 дБ	27,2 дБ	32,4 дБ
9/10	12,8 дБ	18,5 дБ	24,0 дБ	29,5 дБ	35,0 дБ

Для сравнения эффективностей использования систем кабельного цифрового телевизионного вещания DVB- C2 и DVB- C в табл.14 приведены допустимые скорости передачи информации при эквивалентной ширине канала 8 МГц.

Максимальные скорости передачи информации в системах DVB-C и DVB-C2 при эквивалентной ширине канала 8 МГц.

Система	16-QAM	64-QAM	256-QAM	1024-QAM	4096-QAM	
DVB-C	25 Мбит/с	38,4 Мбит/с	51,2 Мбит/с	–	–	
DVB-C2	2/3	–	31,4 Мбит/с	–	–	
	3/4	–	–	47,1 Мбит/с	58,9 Мбит/с	
	4/5	25,1 Мбит/с	37,7 Мбит/с	–	–	
	5/6	–	–	52,4 Мбит/с	65,4 Мбит/с	78,6 Мбит/с
	9/10	28,3 Мбит/с	41,4 Мбит/с	56,6 Мбит/с	70,7 Мбит/с	84,8 Мбит/с

В отличие от стандартов эфирного вещания, стандарт DVB-C2 может не подчиняться жесткой частотной сетке, поскольку кабельная сеть является закрытой экранированной средой и нет необходимости координировать использование ее спектра с эфирными присвоениями. Напротив, можно гибко адаптировать полосу канала под свои конкретные потребности, что позволяет расширить полосу передаваемого сигнала для размещения в нем большего количества услуг. Чтобы не усложнять и не удорожать абонентское оборудование, реализуется сегментированный прием таких каналов, аналогичный используемому в японской системе эфирного телевидения ISDB- T [8 .4 0]. Приемник со стандартной полосой пропускания извлекает из широкого пакета только необходимую часть спектра, не превышающую, например, 8 МГц.

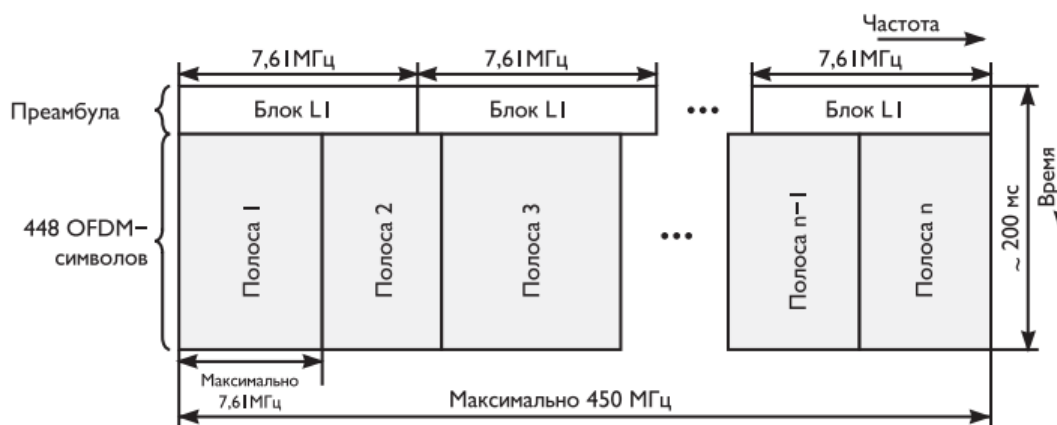


Рис. 5.167. Структура кадра DVB-C2 в частотно-временной области.

Структура кадра DVB- C2 показана на рис.5. Каждый кадр C2 начинается с преамбулы, состоящей из одного или более OFDM-символов и выполняющей две основные функции. С одной стороны, она обеспечивает надежную временную и частотную синхронизацию OFDM- сигнала и самой структуры. С другой стороны, преамбула содержит сигнализацию уровня L1, необходимую для декодирования потоков данных и содержащейся в них полезной информации. Преамбула состоит из циклически передаваемых блоков сигнализации L1, повторяющихся в каждой полосе 7,61 МГц широкого канала. Фиксированное расположение блоков L1 и их повторение с

шагом 7,61 МГц обеспечивают их прием при настройке тюнера на любые 8 МГц из занимаемого кадром диапазона.

Использование многопозиционной модуляции QAM (Quadrature Amplitude Modulation – квадратурная амплитудная модуляция), а также хорошего отношения S/N, который существенно снижает вероятность ошибок BER (Bit Error Rate – частота ошибочных бит) позволило внедрить цифровое телевидение в системы кабельного телевидения.

### Практическая часть [25].

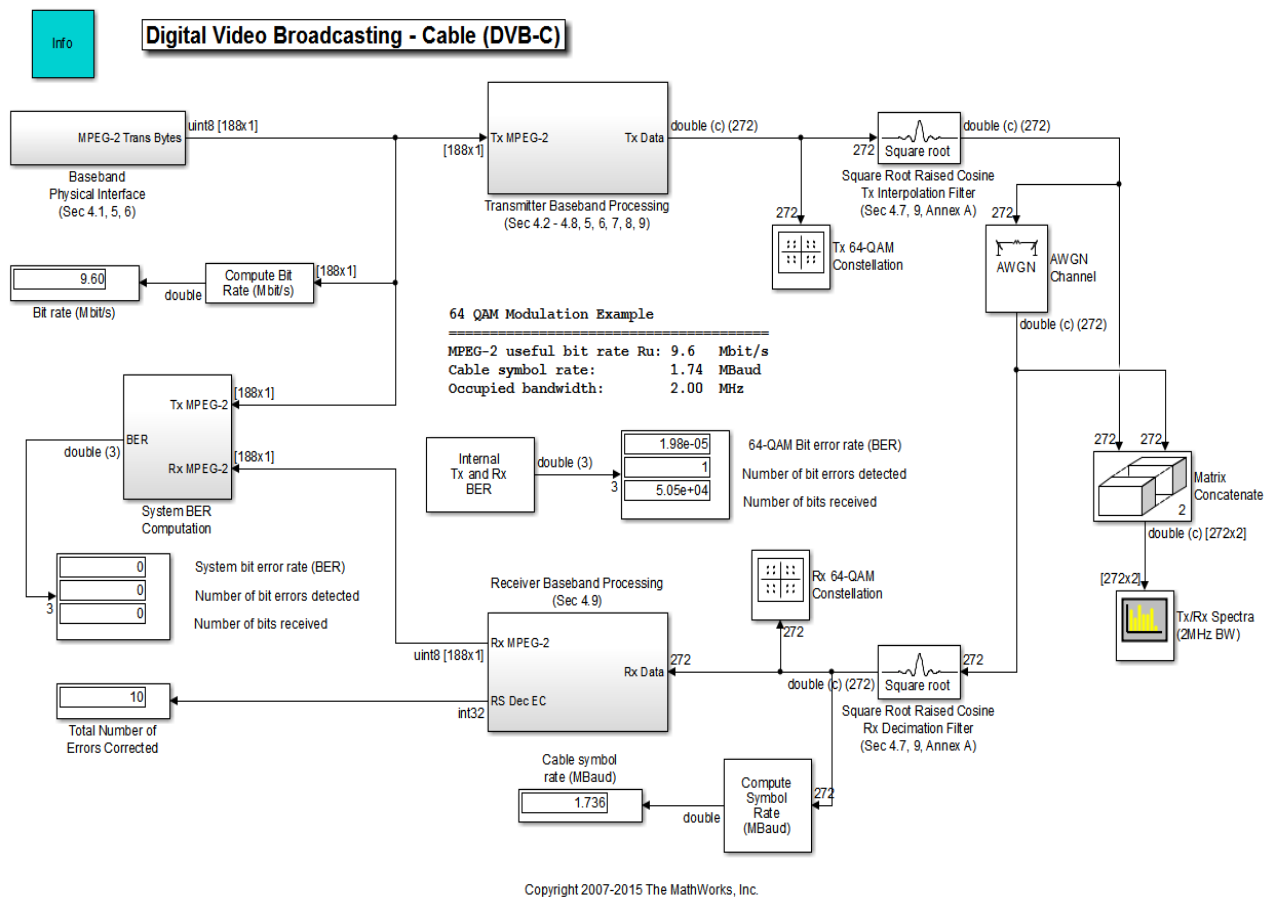


Рис. 5.168. Структурная схема системы цифрового кабельного телевидения DVB-C в Simulink MATLAB 2015

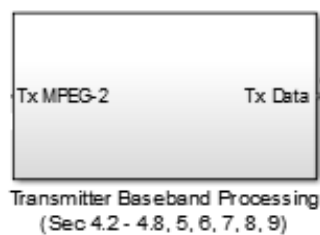


Рис. 5.169. Блок имитация потока данных MPEG- 2.

Внутри данного блока производится имитация потока данных MPEG- 2.

Представленный на рис. блок включает в себя:

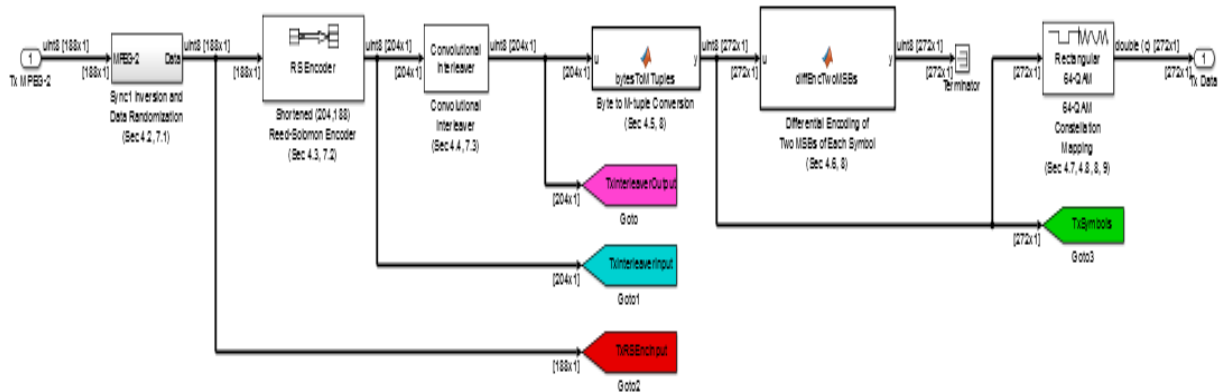


Рис. 5.170. Блок передатчика.

### 1. Sync1 Inversion and Randomization

Эта подсистема инвертирует байт, далее производится рандомизация с целью формирования спектра.

### 2. Кодировщик Рида-Соломона (204, 188).

Добавляет 16 паритетных байтов к MPEG-2.

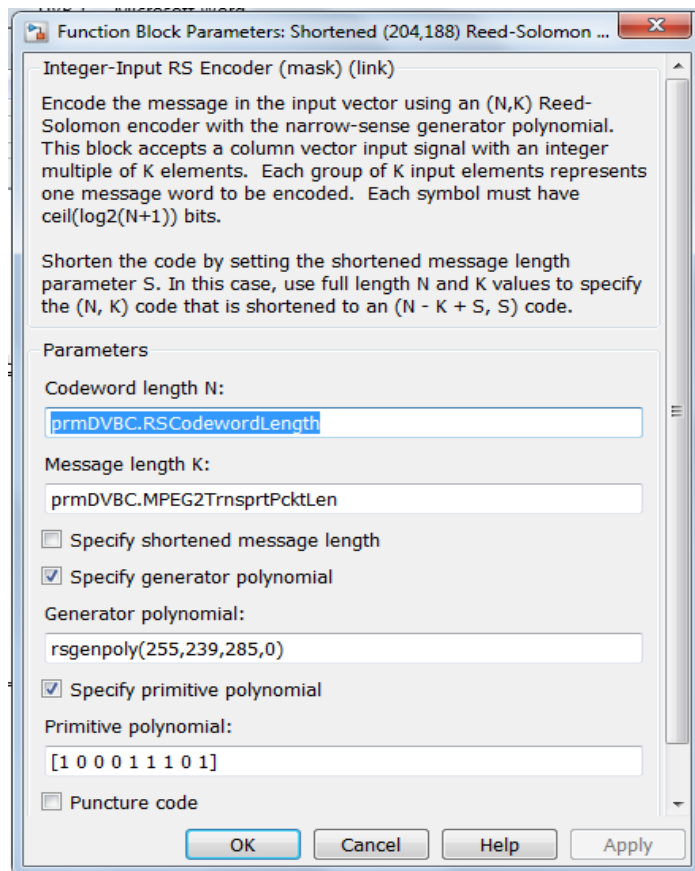


Рис. 5.171. Кодировщик Рида-Соломона (204, 188)

### 3. Сверточный перемежитель.

Процесс перемежения основан на подходе Форни.

### 4. Байт (8 бит) с M- кортежами ( 6 -разрядная версия)

Используется, чтобы преобразовать 8-битные байты данных в 6-битные.

5. Дифференциальное кодирование.

6. Отображение 64-QAM созвездия.

Отображает в основной полосе частот значения ( I и Q ) при передаче.

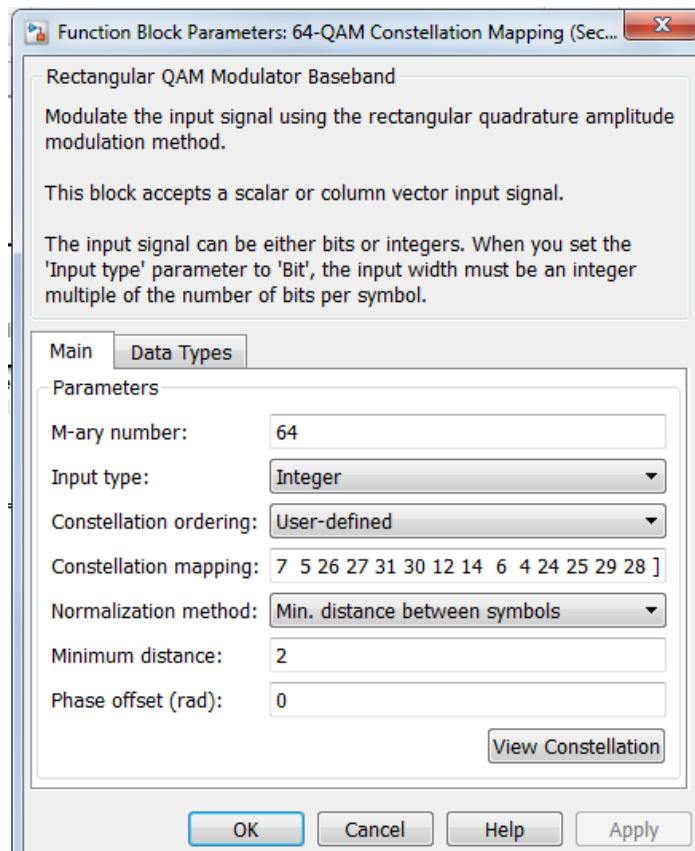
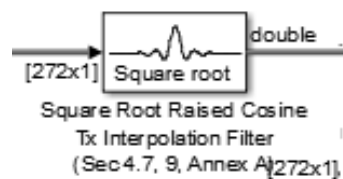
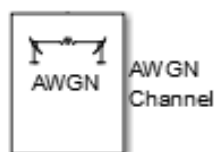


Рис. 5.170. Отображение 64-QAM созвездия.

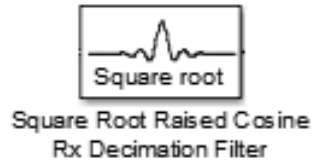


Этот блок выполняет низкочастотное формирование значений символов совокупности для передачи комплекса ( I и Q ).



Изменение белого гауссовского шума в пределах от  $10^{-4}$  до  $10^{-10}, 10^{-11}$ .





Прореживает (фильтрует) значения символа созвездия принимаемого комплекса ( I и Q ).

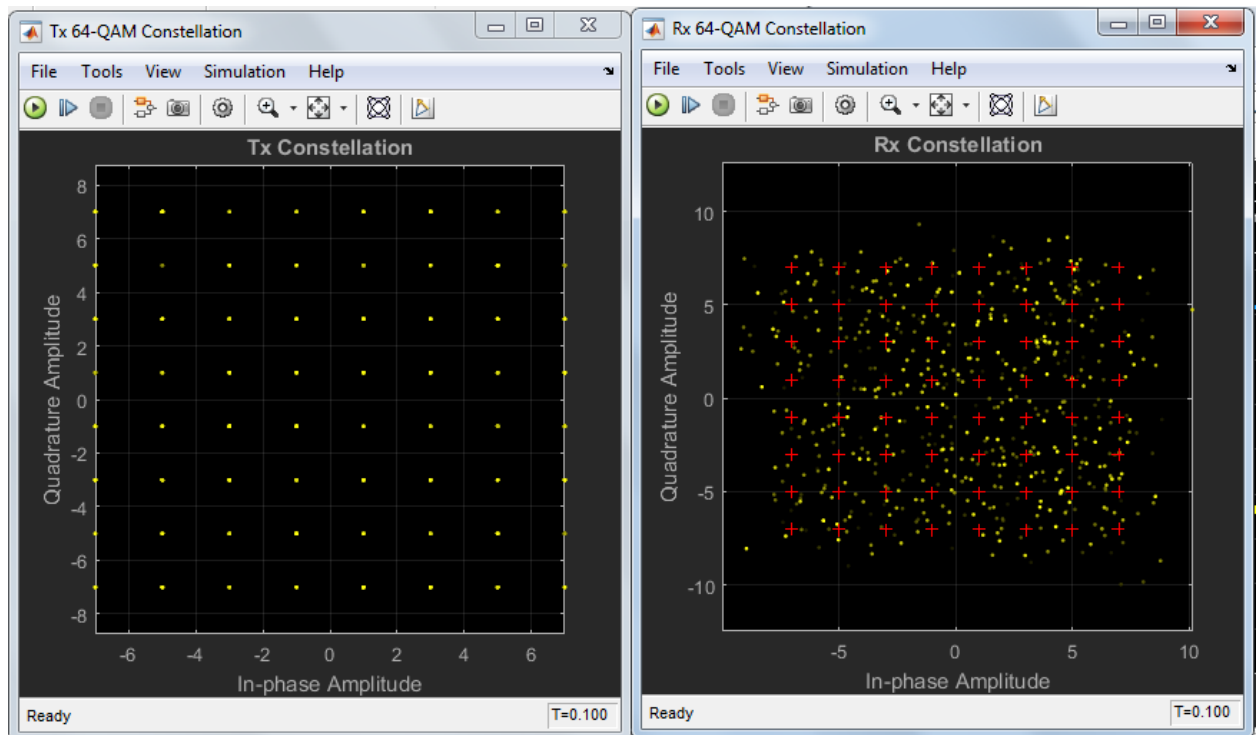
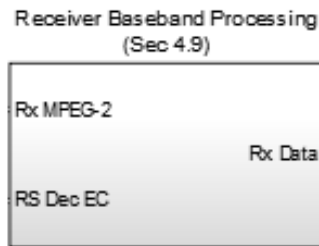


Рис. 5.171. Созвездия передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 5$  дБ.

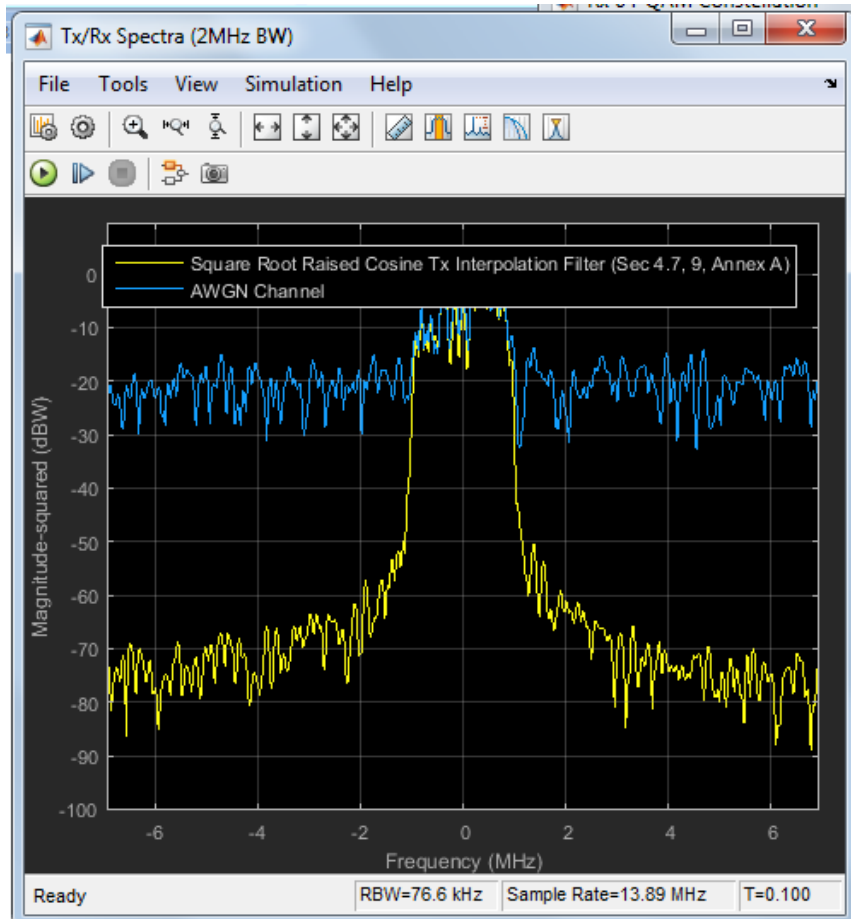


Рис. 5.172. Спектр передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 5$  дБ.

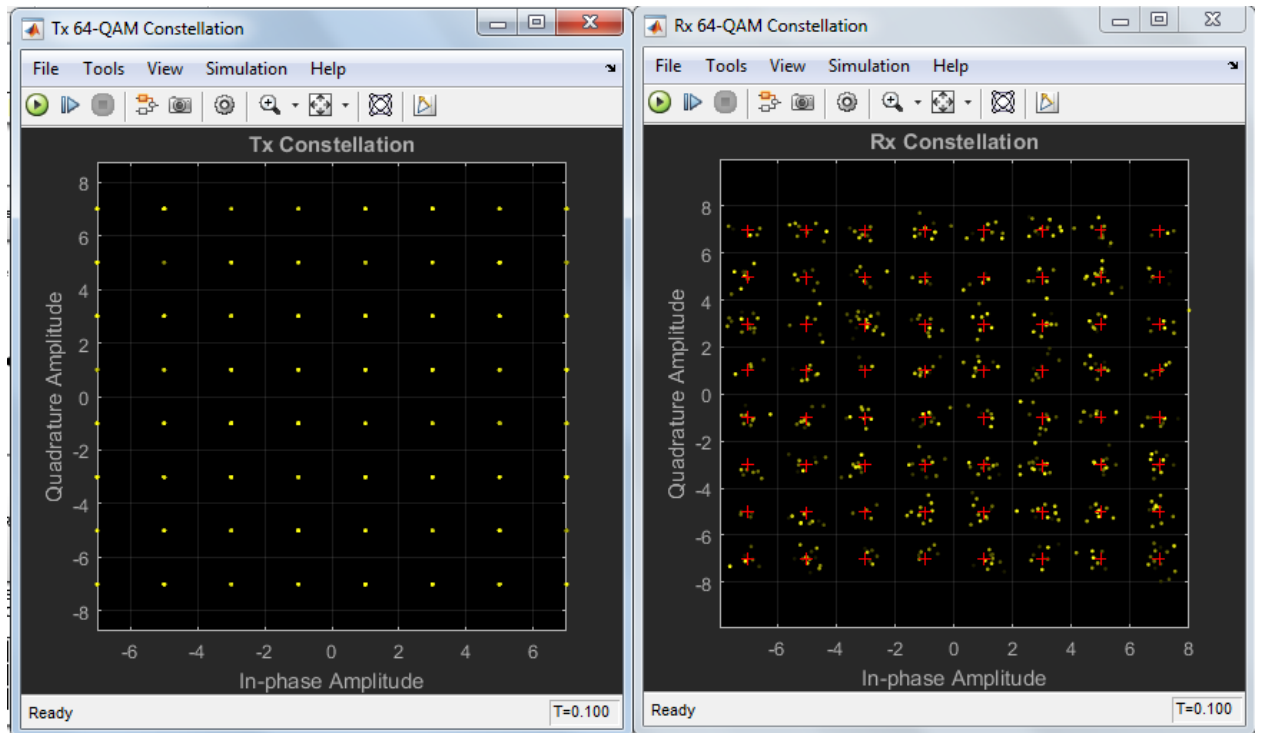


Рис. 5.173. Созвездия передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 15$  дБ.

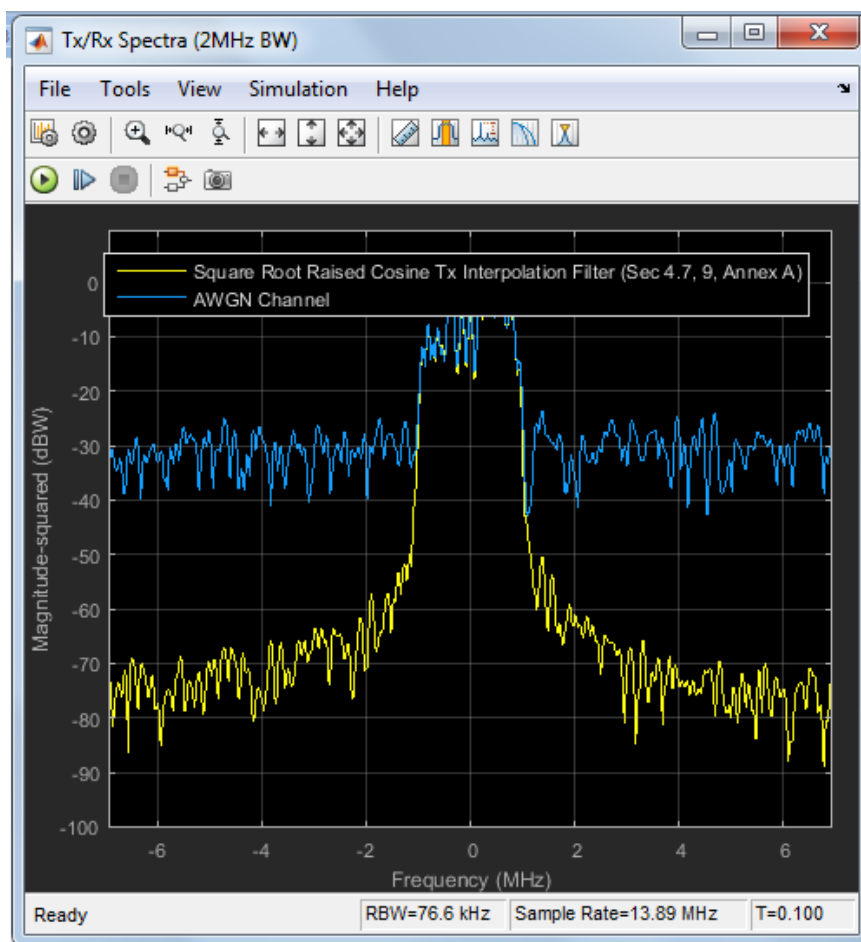


Рис. 5.174. Спектр передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 15$  дБ.

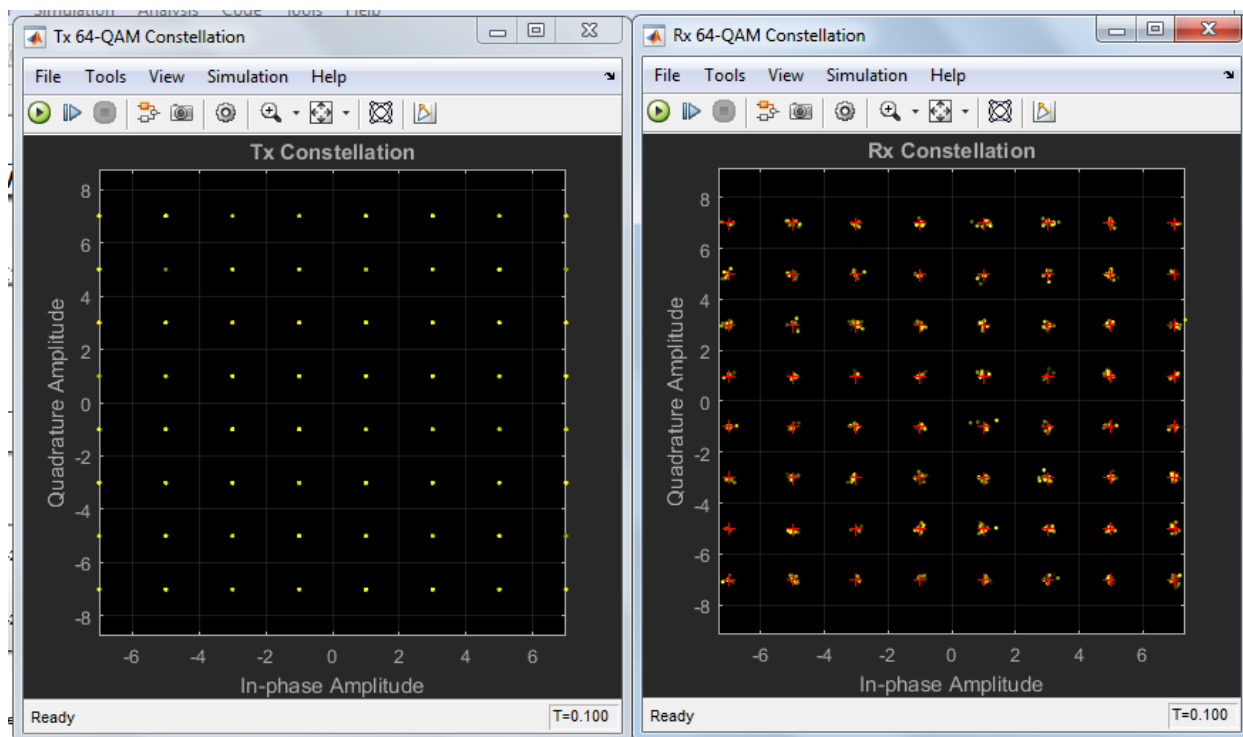


Рис. 5.175. Созвездия передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 19$  дБ.

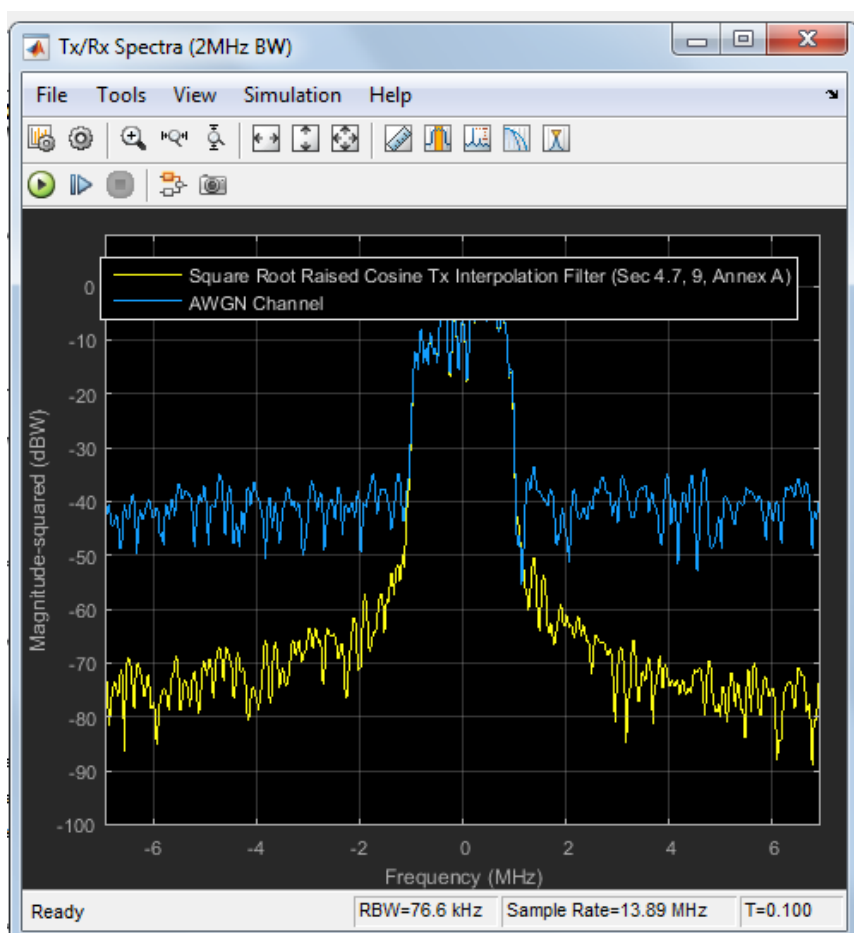


Рис. 5.176. Спектр передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 19$  дБ.

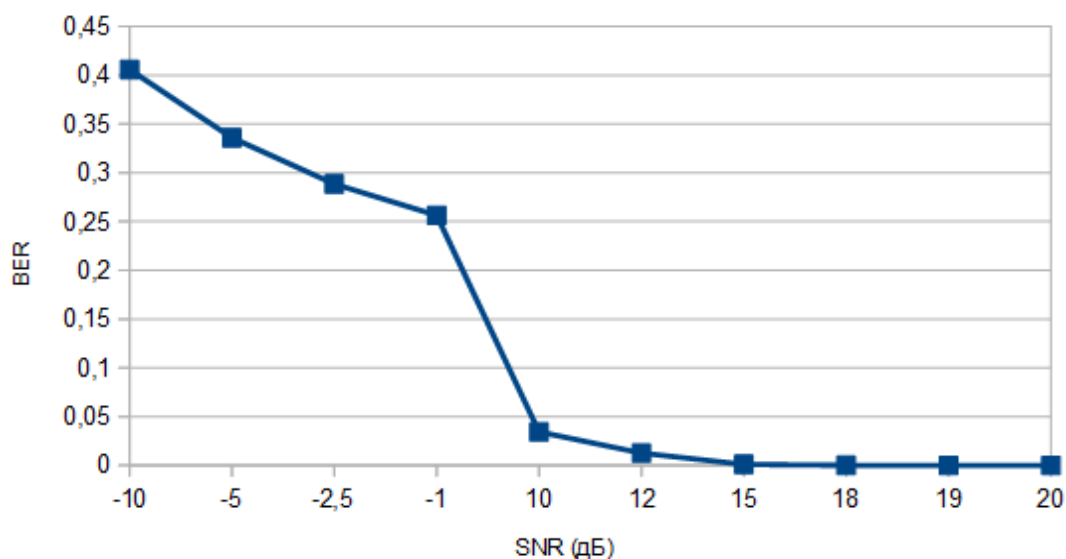


Рис. 5.177. Зависимость BER(SNR) для QAM-64.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

Использование многопозиционной модуляции QAM (Quadrature Amplitude Modulation – квадратурная амплитудная модуляция), а также хорошего отношения S/N, который существенно снижает вероятность ошибок BER (Bit Error Rate – частота

ошибочных бит) позволило внедрить цифровое телевидение в системы кабельного телевидения.

## **5.12. Проектирование защищенной системы цифрового мобильного телевизионного вещания DVB-H и системы высокоскоростного цифрового мобильного ТВ-вещания DVB-H2 [17- 25]**

DVB-H (*DigitalVideoBroadcasting – Handheld*) — европейский стандарт мобильного телевидения, один из семейства стандартов DVB. Стандарт DVB-H позволяет передавать цифровой видеосигнал на мобильные устройства, такие как КПК, мобильный телефон или портативный телевизор. Формально, этот стандарт был принят в ноябре 2004 года.

DVB-H является логическим продолжением стандарта DVB-T с поддержкой дополнительных возможностей, отвечающих требованиям для переносных мобильных устройств с автономным питанием.

### **Технологии мобильного вещания телевизионного вещания DVB-H**

На сегодняшний день существует 8 форматов вещания, ориентированных на прием мобильными терминалами. Во-первых, это форматы DVB-T и DVB-H. Во-вторых, MediaFLO, закрытая система разработки компании Qualcomm. В-третьих, группа форматов, базирующихся на системе радиовещания DAB. К ней относятся MovioSystem, разработанная BritishTelecom, корейские форматы T-DMB и S-DMB, а также европейский профиль формата T-DMB. И, наконец, существует японский стандарт эфирного вещания ISDB-T, по своей гибкости пригодный для любых видов эфирного вещания на любые терминалы.

Система DVB-H разработана на базе DVB-T, что обеспечивает их частичную совместимость. Она заключается в том, что трансляции DVB-H за исключением одного режима модуляции могут приниматься приемниками DVB-T, и в одном мультиплексированном потоке возможно совмещение трансляций DVB-H и DVB-T.

В то же время в DVB-H введен ряд добавлений на физическом уровне и заметно изменен канальный уровень.

### **DVB-T и DVB-H**

Характеристики системы DVB-T неоднократно изложены в литературе<sup>1</sup>, поэтому напомним только его основные особенности. Главным отличием DVB-T от кабельной и спутниковой версий стандарта DVB является использование COFDM (CodedOrthogonalDivisionMultiplexing) модуляции. При таком способе модуляции применяется частотное мультиплексирование ортогональных несущих в сочетании с помехоустойчивым кодированием. Использование большого числа несущих позволяет

удлинить время передачи каждого символа и выделить период защитного интервала для отстройки от помех многолучевого приема. В зависимости от количества ортогональных несущих в стандарте выделяется два режима 8К (8192 несущих) и 2К (2048 несущих). DVB-T предусматривает возможность использования трех видов модуляции — QPSK, 16 QAM и 64 QAM, четырех вариантов относительной длительности защитного интервала, а также пяти вариантов относительной скорости при наложении сверточного помехозащитного кодирования. Сочетания этих параметров позволяют гибко выбирать режим в зависимости от радиуса охвата соты, ландшафта и РЧ обстановки. Наличие защитного интервала дает возможность использовать DVB-T и для передачи на мобильные терминалы, в том числе движущиеся с большой скоростью. Но для передачи ТВ на мобильные телефоны и другие миниатюрные приемники эта система оказалась малоприспособной. DVB-T оптимизирован для передачи стандартных ТВ потоков, в то время как карманные приемники имеют небольшие экраны, позволяющие воспроизвести картинку формата не более чем 1/4 CIF или 1/8 CIF. Кроме того, эти терминалы питаются от слабых аккумуляторных батарей, которые желательно эксплуатировать в максимально экономичном режиме. И, наконец, они имеют слабые приемные антенны и часто должны принимать сигнал в неблагоприятных условиях, в то время как размещение стационарных эфирных антенн может быть оптимизировано. С учетом всех этих обстоятельств для эфирной передачи на карманные мобильные терминалы была разработана специальная система DVB-H (DigitalVideoBroadcasting-Handheld), по возможности совместимая с DVB-T, но одновременно учитывающая перечисленные особенности приема. Рассмотрим компоненты DVB-H, относящиеся к физическому и каналному уровням системы ISO/OSI.

Обобщенная архитектура системы DVB-H изображена на рисунке 1. Зеленым цветом помечены элементы, добавленные в DVB-H.

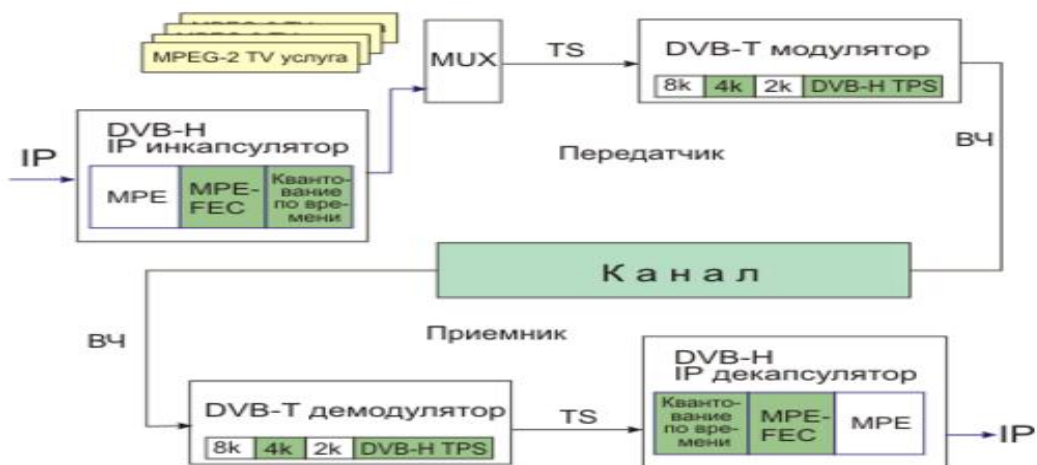


Рис. 5.178. Обобщенная архитектура системы DVB-H

## Физический уровень

На физическом уровне система DVB-H максимально приближена к DVB-T. Поэтому укажем только дополнительные возможности, появившиеся в DVB-H.

Во-первых, к режимам модуляции 2К и 8К был добавлен еще один — 4К. Это дало дополнительную степень свободы в плане обмена максимальной скорости передвижения приемника на радиус охвата одной соты. Чем меньшее количество ортогональных несущих используется при COFDM модуляции, тем больший частотной интервал образуется между соседними несущими, и, соответственно, тем выше скорость движения терминала, при котором прием срывается из-за Доплеровского смещения частот.

С другой стороны, чем меньше несущих, тем короче период, выделенный для передачи каждого COFDM символа и, соответственно, короче защитный интервал. А сокращение защитного интервала снижает возможности отстройки от многолучевого приема, то есть уменьшает допустимый радиус соты. Для сетей DVB-T, рассчитанных в основном на стационарный прием, значительно более важным фактором является зона охвата. Что же касается сетей DVB-H, то там большую значимость приобретает возможность приема на скорости, а зона охвата в сильной мере ограничивается уровнем сигнала на входе тюнера.

Для возможности выбора компромиссного варианта был добавлен режим модуляции 4К, заполняющий нишу между 2К и 8К. Трансляции в режиме 4К могут приниматься только приемниками DVB-H.

Вторым дополнением на физическом уровне стала возможность более глубокого перемежения данных в режимах 4К и 2К. Канальное кодирование DVB-T предусматривает перемежение данных внутри одного COFDM символа. Оно в основном предназначено для компенсации селективных замираний, несущих при многолучевом приеме. В то же время мобильные терминалы с большей вероятностью могут оказаться в зоне действия широкополосных импульсных помех. И, как уже отмечалось, при приеме на скорости появляется доплеровское смещение частотного спектра, также приводящее к искажениям сигнала. Поэтому в стандартах мобильного вещания на базе COFDM (DAB, ISDB -T) для борьбы с последствиями длительных помех в цикл канального кодирования введено перемежение длинных серий данных, охватывающее десятки, а то и сотни OFDM символов.

Чем длиннее последовательность данных, участвующих в перемежении, тем эффективнее оказывается борьба с последствиями затуханий. Но для DVB-H такой путь невозможен. Во-первых, восстановление длинных последовательностей потребовало

бы непрерывного приема, в то время как для целей энергосбережения в DVB-H реализован описанный ниже импульсный режим передачи. Во-вторых, для его осуществления необходимы большие объемы памяти, удорожающие приемник. И, наконец, это противоречит требованию совместимости с DVB-T. Поэтому было выбрано компромиссное решение. Для режима модуляции 8К, наиболее актуального для DVB-T, в DVB-H сохранено перемежение битов в рамках одного символа. А в режимах 4К и 2К, где каждый COFDM символ переносит меньшее количество информации, в качестве опции введена возможность временного перемежения, допускаемого объемами выделенной для этих целей памяти. Для 4К перемежение выполняется с глубиной в 2 COFDM символа, а для режима 2К — с глубиной в 4 COFDM символа. При активизации этой опции совместная передача трансляций DVB-H и DVB-T невозможна. Одновременно предусматривается опция дополнительной помехозащиты, реализованная на базе IP дейтаграмм и позволяющая в сильной мере компенсировать отсутствие глубокого перемежения. Принцип ее действия изложен позже.

Остальные механизмы внешнего и внутреннего канального кодирования, используемые в DVB-T, без изменения перенесены в DVB-H. Третье дополнение касается транспортной сигнализации (TPS — TransmissionParameterSignalling)<sup>2</sup>, в которую добавлены два бита, индицирующие наличие в потоке услуг, передаваемых в формате DVB-H, а также наличие дополнительной кодозащиты, реализуемой на базе IP дейтаграмм. Четвертым дополнением стала возможность использования полосы 5 МГц при условии, что эта она выделяется не в вещательном диапазоне. Она добавлена к полосам 6, 7 и 8 МГц, допускаемых к использованию в DVB-T. Ее планируется применять при развертывании сетей DVB-H в США в L-диапазоне (1,670-1,675 ГГц).

#### Параметры режимов 2К, 4К, 8К

Параметр	2К	4К	8К
Число активных несущих	1705	3409	6817
Число информационных несущих	1512	3024	6048
Длительность периода $T$ , мс	0,109	0,109	0,109
Полезная символьная часть $T_u$ , мс	224	448	896
Разнос между несущими $1/T_u$ , Гц	4464	2232	1116
Разнос между несущими $K_{min}$ и $K_{max}$ , МГц	7,61	7,61	7,61



## Канальный уровень

Одно из основных отличий DVB-H от DVB-T заключается в том, что в новой системе вся информация должна передаваться в форме IP дейтаграмм, инкапсулируемых в транспортные пакеты MPEG-2 TS с использованием метода многопротокольной инкапсуляции (MPE MultiProtocolEncapsulation). Это один из четырех методов инкапсуляции пакетов данных в транспортные пакеты MPEG-2 TS, определенных DVB, единственно пригодный для передачи потоковых услуг. Схема инкапсуляции показана на рисунке 5.179.

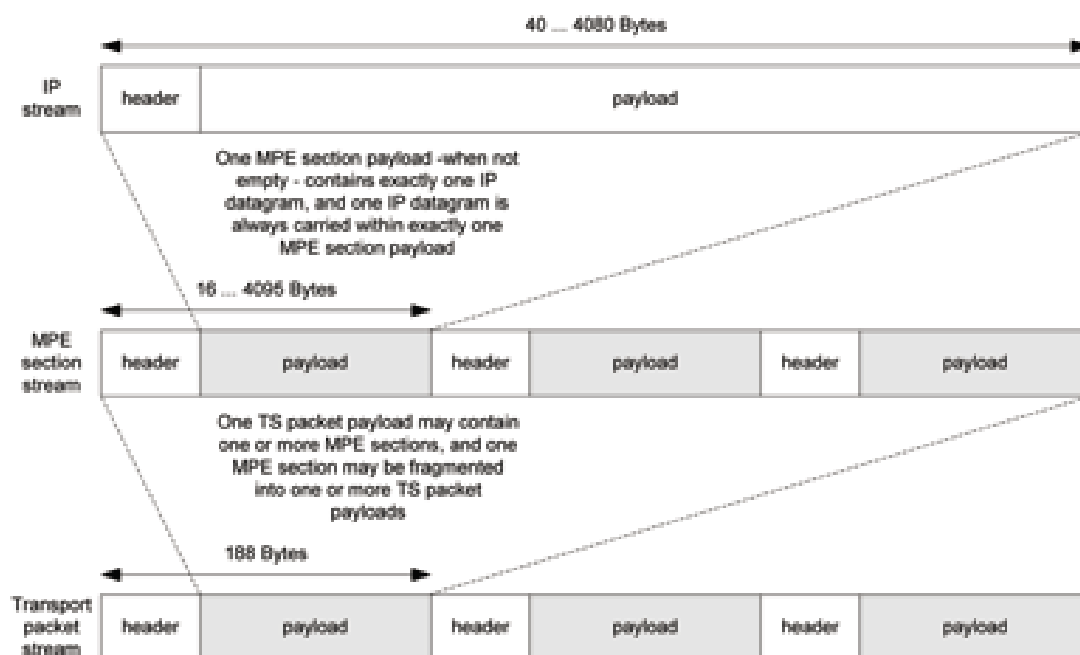


Рис. 5.179. Формат IP дейтаграммы

IP пакеты инкапсулируются в MPE секции, а те, в свою очередь, — в транспортные пакеты MPEG-2 TS, переносящие элементарные потоки. Каждый IP пакет занимает одну MPE секцию, длина которой практически не коррелирована с емкостью пакетов MPEG2-TS. В одном пакете может передаваться множество MPE секций, и, наоборот, одна секция может занимать несколько транспортных пакетов.

Данные, относящиеся к одной услуге, инкапсулируются в транспортные пакеты MPEG-2 с постоянным идентификационным номером PID. Использование такого стека обусловлено тремя причинами.

Во-первых, в системах DVB-H предполагается передавать ТВ потоки, компрессированные не в MPEG-2, а в более эффективных форматах, в первую очередь, в H.264 /AVC3, для которых процесс инкапсуляции компрессированных аудио и видео в транспортные пакеты MPEG-2 TS жестко не специфицирован и обычно реализуется как раз через IP/MPE инкапсуляцию. Более того, DVB-H потенциально рассматривается как составная часть гибридной системы доставки мультимедийных услуг (IPDC).

В связи с этим понятие элементарного потока в DVB-H определяется иначе, чем

в стандарте MPEG-2. В DVB-H это просто поток, передаваемый в пакетах с одним PID-ом. Снята жесткая корреляция элементарного потока с данными определенного типа. В одном элементарном потоке могут передаваться все данные, относящиеся к определенной ТВ программе или даже к нескольким программам. В последнем случае потоки разных ТВ программ будут передаваться в дейтаграммах с разным мультикастовым IP адресом и заключаться в MPE секции с разными MAC адресами. Аналогичным образом могут передаваться и не телевизионные услуги.

### MPE-FEC

В DVB-H канальное кодирование накладывается на всю последовательность IP дейтаграмм, передаваемых в одном слоте, то есть на максимально возможный объем данных. Это кодирование введено в качестве опции и выполняется кодом Рида-Соломона. Принцип кодирования показан на рисунке 4.49.

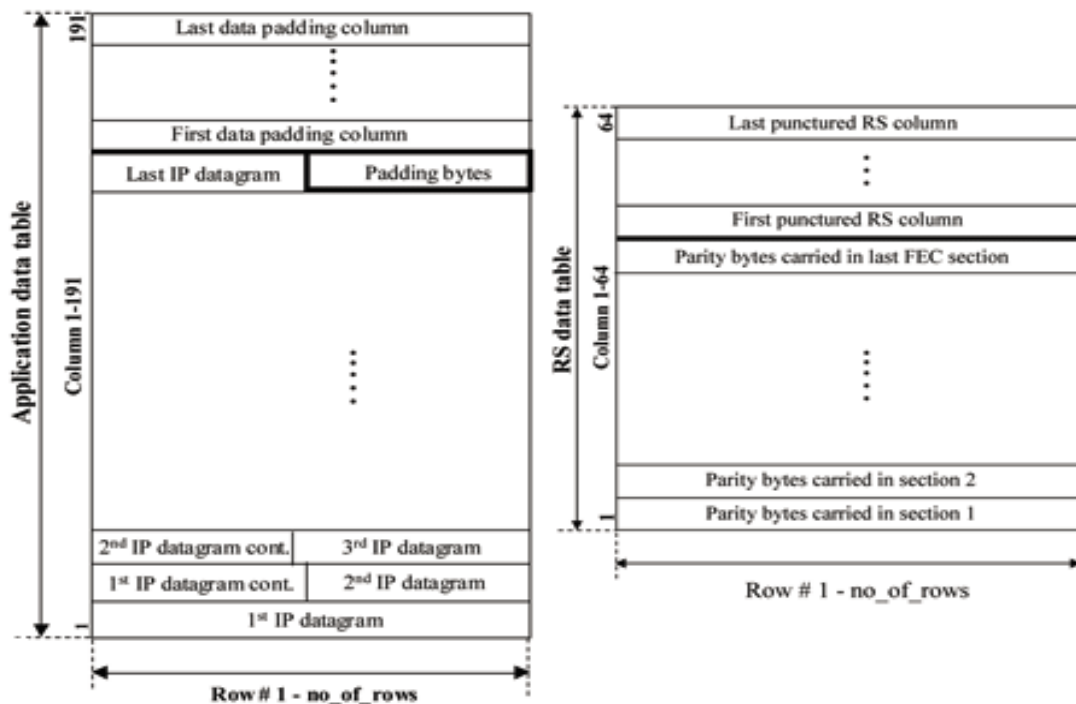


Рис. 5.180. Кодирование пакетов кодом Рида-Соломона

IP дейтаграммы помещаются в таблицу ApplicationDataTable, в которой последовательно заполняются столбцы начиная с левого верхнего угла. Высота столбцов может составлять от 1 до 1024 байт в зависимости длины дейтограмм, а их количество всегда одинаково — 191. Если в таблице остается пустое место, то оно заполняется холостыми байтами. Затем каждый ряд таблицы кодируется кодом Рида-Соломона (255, 191), в результате чего формируется 64 контрольных байта, заносимых в соответствующий ряд FEC таблицы. Затем обе таблицы инкапсулируются в пакеты MPEG-2 TS и транслируются в одном слоте. Вначале — информационная часть, а затем — контрольная. Причем байты контрольной таблицы при инкапсуляции считываются не рядами, как формируются, а колонками. Так создается виртуальное перемежение

контрольных байт, требующее минимальных ресурсов приемника для восстановления их последовательности. Этот метод помехозащитного кодирования получил название MPE-FEC.

MPE-FEC декодирование рекомендуется проводить на базе модели канала со стиранием<sup>4</sup>. Такое декодирование используется в каналах с пакетной передачей и включает два этапа.

На первом этапе с помощью циклического (CRC-х) кода выявляются искаженные пакеты и локализуются пораженные части потока. На втором этапе выполняются восстановление пораженных пакетов, что при предварительной локализации искажений происходит более эффективно. CRC-х кодирование — стандартный способ помехозащиты пакетов информации. В частности, каждая MPE секция защищается кодом CRC-32. При использовании MPE-FEC незащищенными остаются служебные таблицы. Но с учетом того, что их содержание в большинстве случаев довольно статично, то после несколько циклов передачи ресиверу удастся получить нужную информацию даже в сложных условиях. Посылка, защищенная MPE-FEC, может быть принята и ресиверами DVB-T. Но они будут игнорировать контрольные байты и не смогут воспользоваться защитой MPE-FEC.

Таким образом, особенности канального уровня формата DVB-H не препятствуют приему трансляций ресиверами DVB-T. Они просто будут принимать их неоптимальным образом. различными будут и условия приема трансляций DVB-T и DVB-H. Экспериментальные измерения показали, что для достижения передатчиками DVB-H и DVB-T одинаковой зоны охвата мощность первого должна быть на 20 дБ больше. В то же время требуемый для устойчивого приема уровень несущая/шум в DVB-H в среднем на 30% ниже, а максимально возможная скорость движения приемника – на 40% выше. В таблицах 5.16 и 5.17 представлены расчетные значения цифровых потоков для разных форматов модуляции и длительностей используемых интервалов.

MPE-FEC кодированием в 3/4

Модуляция	Скорость кодирования	Защитный интервал			
		¼	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,74	4,15	4,39	4,52
	2/3	4,98	5,53	5,86	6,03
	3/4	5,6	6,22	6,59	6,79
	5/6	6,22	6,92	7,32	7,54
	7/8	6,53	7,26	7,69	7,92

16QAM	1/2	7,46	8,3	8,78	9,05
	2/3	9,95	11,06	11,71	12,07
	3/4	11,2	12,44	13,17	13,58
	5/6	12,44	13,82	14,64	15,08
	7/8	13,07	14,51	15,37	15,83
64QAM	1/2	11,2	12,44	13,17	13,58
	2/3	14,93	16,59	17,57	18,1
	3/4	16,79	18,66	19,76	20,36
	5/6	18,66	20,74	21,95	22,62
	7/8	19,6	21,77	23,06	23,75

Длительность интервалов MPE-FEC кодированием в 3/4

Параметр	Режим											
	2k	4k	8k	2k	4k	8k	2k	4k	8k	2k	4k	8k
Полезная символьная часть $T_U$	2048 T 224 мкс											
Защитный интервал $\Delta/T_U$	1/4			1/8			1/16			1/32		
Длительность защитного интервала $T_g$	5 12 T 56 ms	1 1024 T 112 ms	20 48 T 224 ms	2 56 T 28 ms	5 12 T 56 ms	10 24 T 112 ms	1 28 T 14 ms	2 56 T 28 ms	5 12 T 56 ms	6 4 T 7 ms	12 8 T 14 ms	2 56 T 28 ms
Полная продолжительность $T_S = \Delta + T_U$	2 560 T 280 ms	5 120 T 560 ms	10 240 T 1120 ms	2 304 T 252 ms	4 608 T 504 ms	92 16 T 1008 ms	2 176 T 238 ms	4 352 T 476 ms	8 704 T 952 ms	2 112 T 231 ms	42 24 T 462 ms	8 448 T 924 ms

В стандарте DVB-T в качестве базовой используется OFDM модуляция, благодаря которой и достигаются уникальные свойства в части возможности построения одночастотных сетей (SFN – SingleFrequencyNetwork), возможности обеспечения низкого требуемого отношения несущая/шум (C/N), высокой защиты от переотраженных объектов и низкой чувствительности к эффекту Доплера (при приеме в движении). Помимо основных видов модуляции (QPSK, 16 QAM и 64 QAM) в стандарте DVB-T используется также и иерархическая модуляция, позволяющая в потоке с высоким приоритетом передавать меньшее число программ и даже с более худшим качеством, но со значительным увеличением зоны покрытия, представляя тем самым вестить прием на мобильные устройства.

### **DVB-H2**

DVB-H2 (NewGenerationHandheld) - на основе стандарта DVB-T2, DVB-NGH открывает путь для улучшения возможностей приема сигнала на мобильные и портативные устройства.

Они включают в себя MIMO (MultipleInputMultipleOutput, мультивход и мультивыход), частотно-временное разнесение (TFS) с одним тюнером, повернутые созвездия, улучшена и расширена проверка на четность с низкой плотностью, более эффективное чередование по времени и ультра-надежный уровень сжатия Layer-1. Спецификация DVB-NGH также включает гибридные профили, где наземные и спутниковые методы передачи данных могут быть объединены.

DVB-NGH охватывает последние модуляции и технологии кодирования и может рассматриваться как наиболее сложный радиointерфейс наземного вещания. Кроме того, он также предлагает дополнительную гибкость в эксплуатации, например, различные виды защиты для аудио- и видеопотоков в одном сервисе.

### **Разработка структурной схемы программного комплекса [25]**

Система DVB-H была реализована в программной среде Matlab 2015a. Для того, чтобы запустить систему необходимо ввести команду: `open_system('commdvbt_alt');`

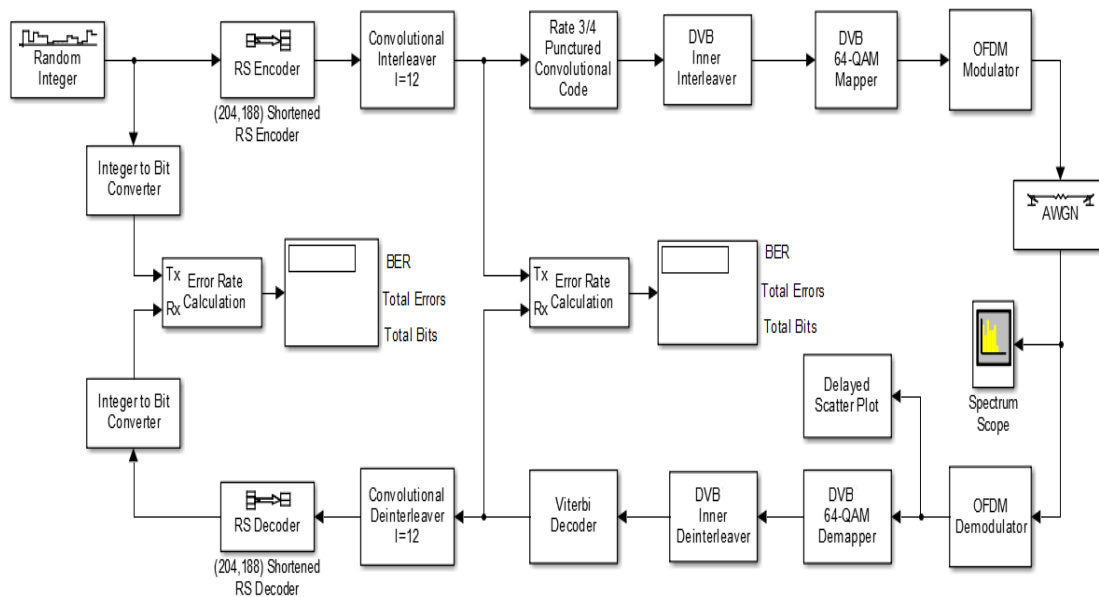


Рис. 5.182. Структурная схема DVB-H в режиме 2k Mode

Передающая часть структурной схемы системы состоит из следующих блоков:

RandomInteger – Генератор псевдослучайное последовательности.

RSEncoder – Код Рида-Соломона (255,191).

ConvolutionalInterleaver – Сверточный перемежитель.

PuncturedConvolutionalCode – Сверточный кодер, с порождающими полиномами  $G1=171$  и  $G2=133$ .

DVBInnerInterleaver – Внутренний перемежитель, состоящий из бит перемежителя и символьного перемежителя. В битовом перемежителе данные демультиплексируются на  $v$  подпотоков, где  $v = 2, 4$  и  $6$  для QPSK, 16-QAM и 64-QAM, соответственно.

DVB64-QAMMapper – Все данные поднесущих объединяются в одном символе OFDM, которые модулируются с использованием QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

OFDMModulator – Каждый символ состоит из 6817 и 1705 несущих для 8k и 2k режимов соответственно. Длительность символа состоит из двух частей: полезная часть и защитный интервал (1/4, 1/8, 1/16, 1/32).

AWGN – Канал с шумами.

### Практическая часть

Запустить модель системы DVB-H в программе Matlab следующим образом: Matlab R2015 – Simulink Model – Open – dvbh.slx [25].

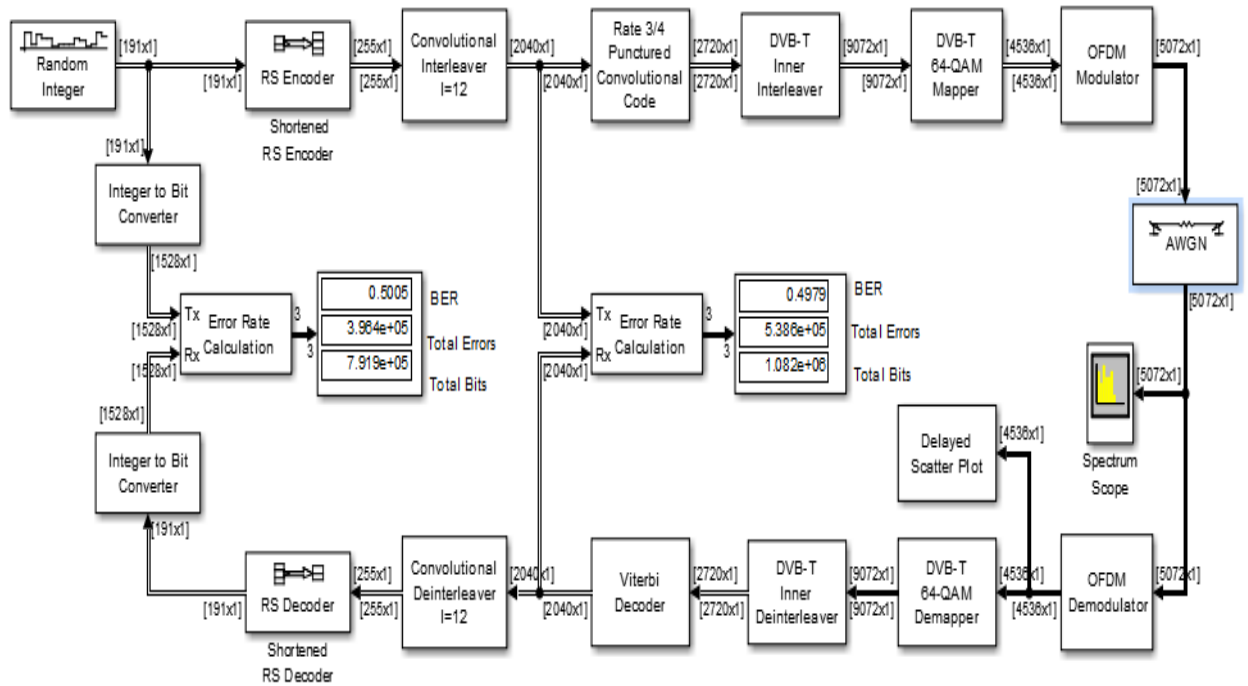


Рис. 5.183. Функциональная схема системы DVB-H реализованная в Matlab R2015b – Simulink

Выставить необходимые параметры для следующих блоков: Random-Integer Generator, RS Encoder-Decoder, Параметры DVB Inner Deinterleaver (Buffer3), OFDM modulator-demodulator (для QPSK длина FFT: 5072, для 16-QAM длина FFT: 2804).

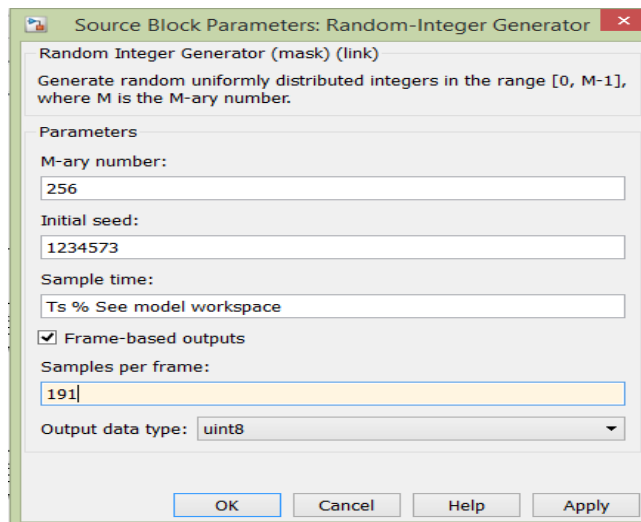


Рис. 5.184. Параметры Random-Integer Generator

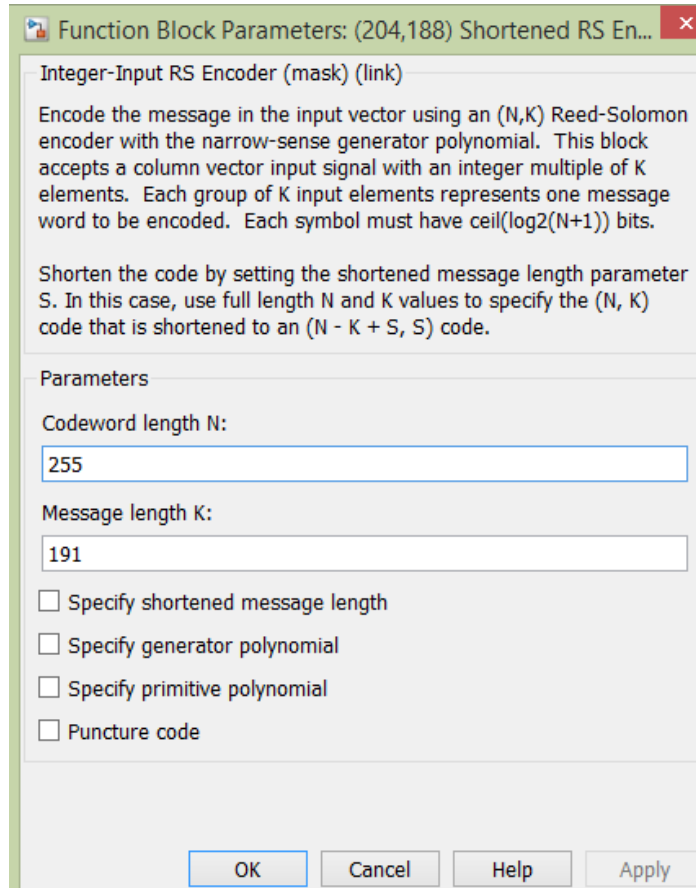


Рис. 5.185. Параметры RS Encoder-Decoder

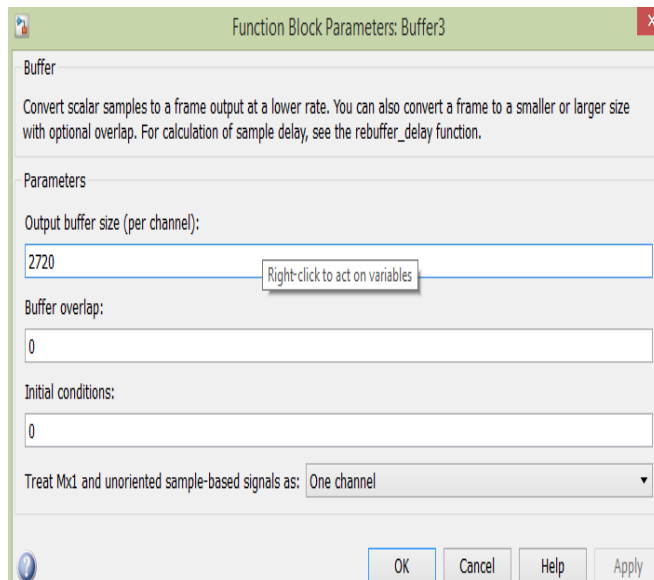


Рис. 5.186. Параметры DVB Inner Deinterleaver (Buffer3)



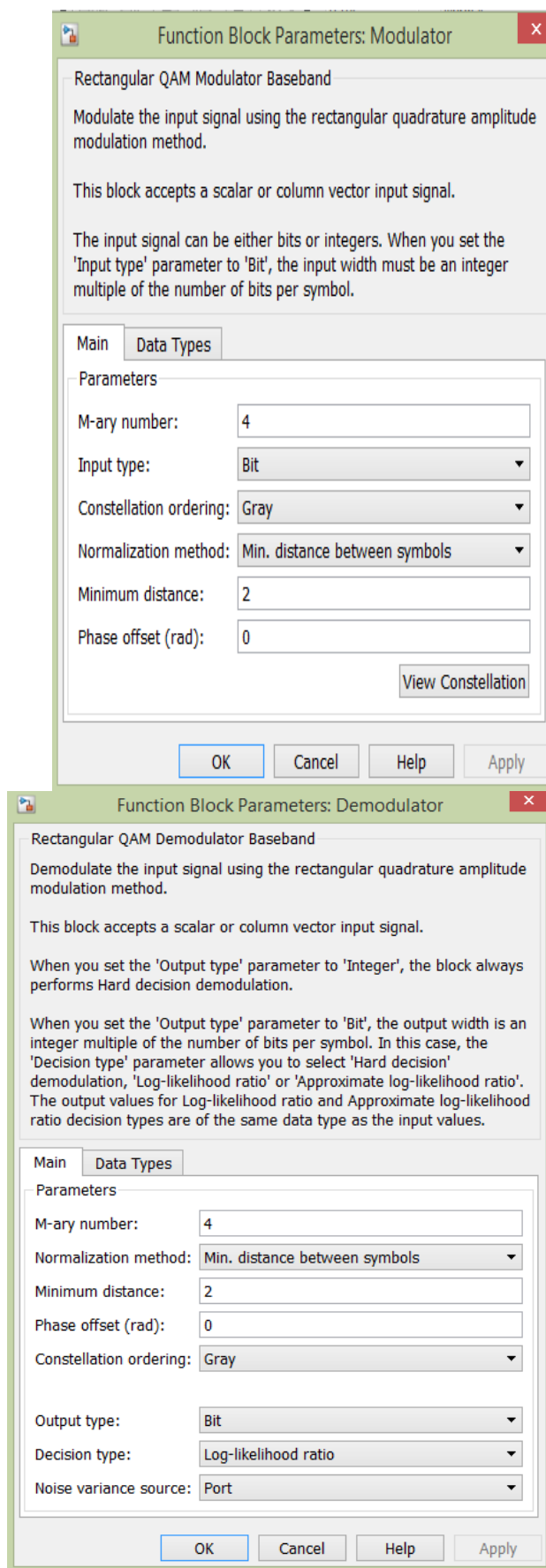


Рис. 5.187. Параметры QPSK модулятора

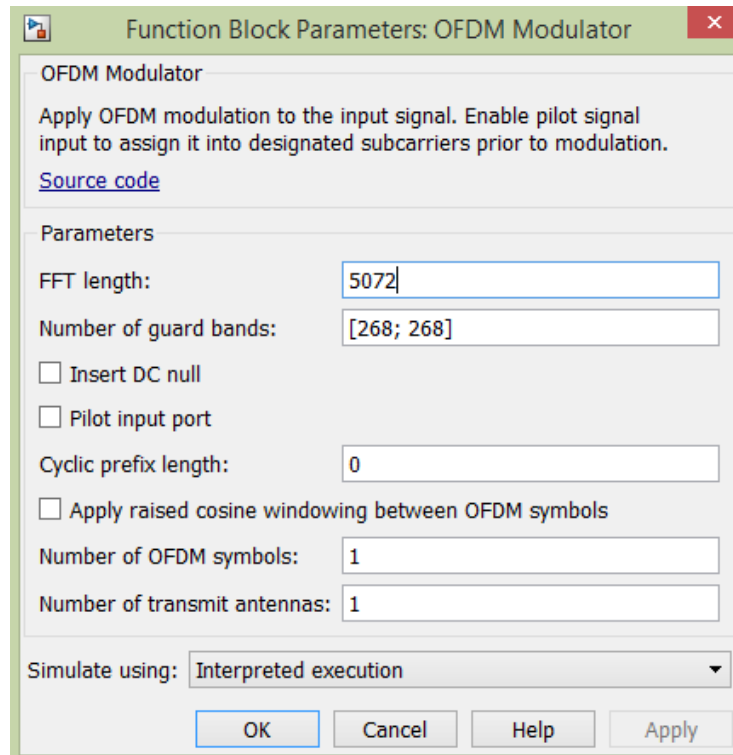
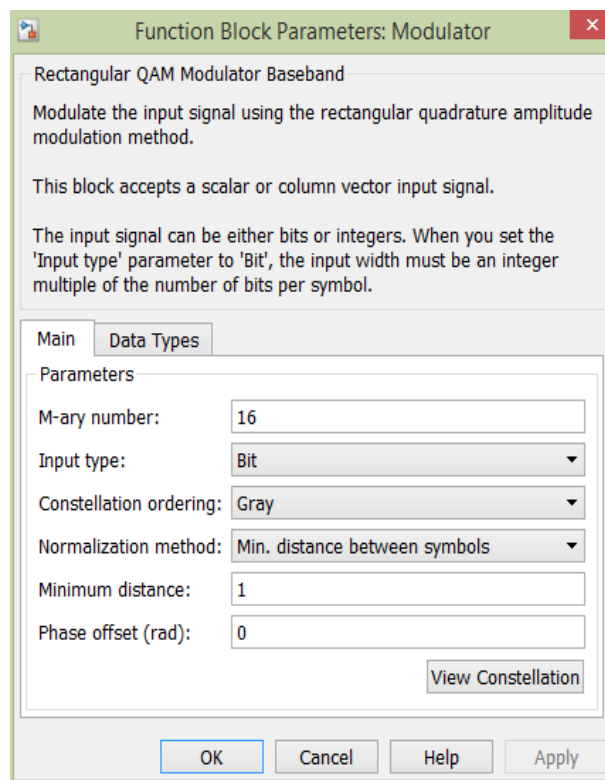


Рис. 5.188. Параметры OFDM modulator-demodulator



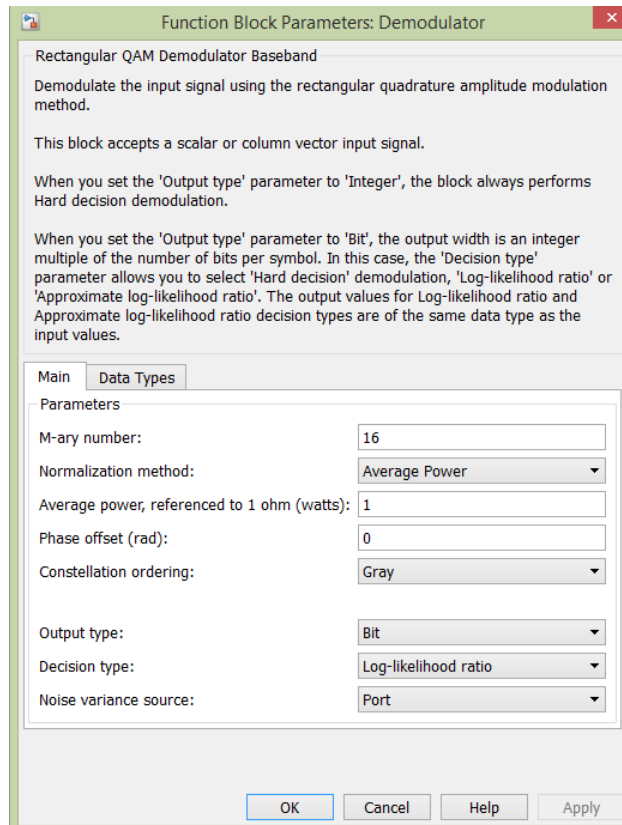


Рис. 5.189. Параметры 16-QAM модулятора

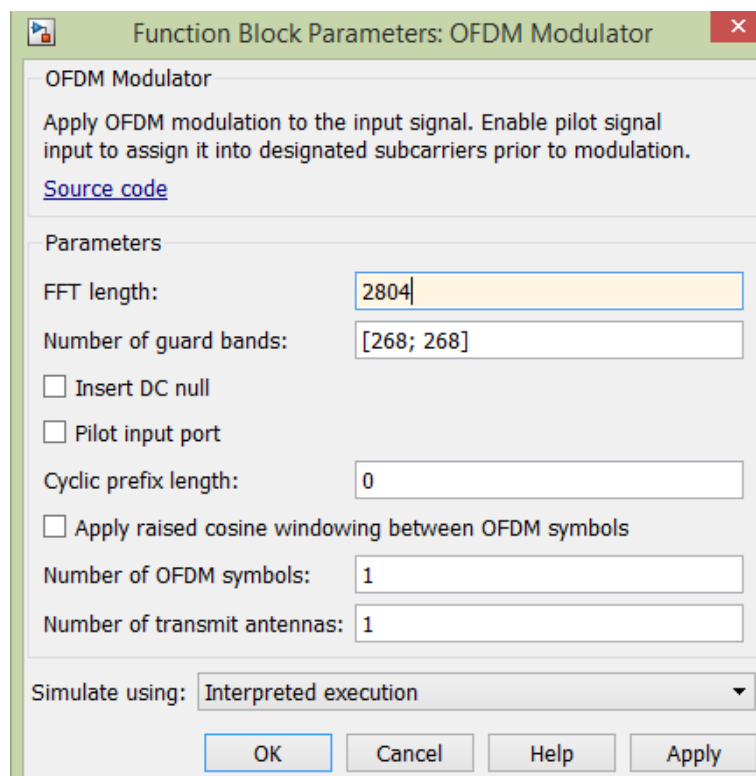


Рис. 5.190. Параметры OFDM modulator-demodulator

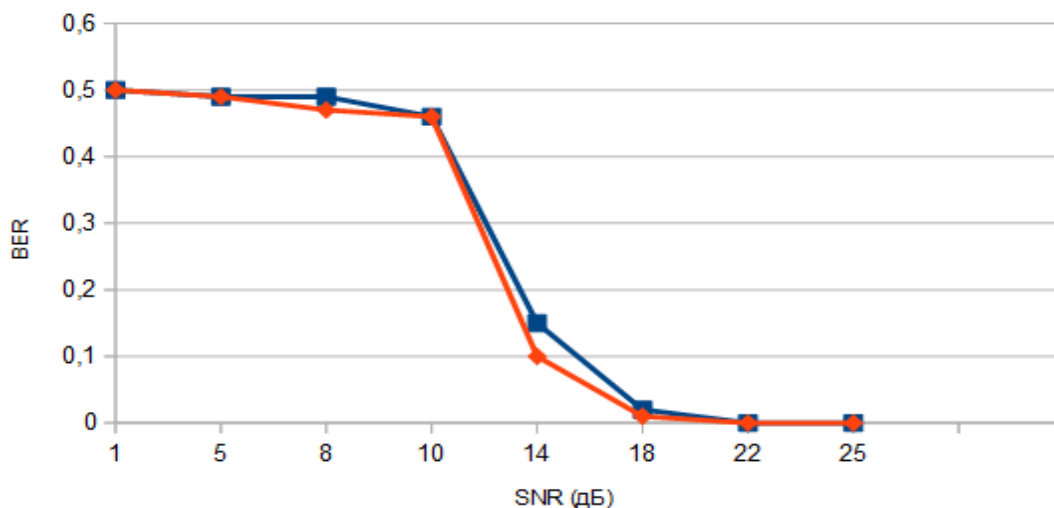


Рис. 5.191. Зависимость BER от SNR для системы DVB-H при использовании QPSK (синий) и 16-QAM (красный).

При исследовании зависимости битовой вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум рассматриваемой системы мобильного вещания были сняты изображения спектра передаваемого сигнала и диаграммы созвездий QPSK и 16-QAM исследуемой системы при SNR равном 1 дБ, 18 дБ.

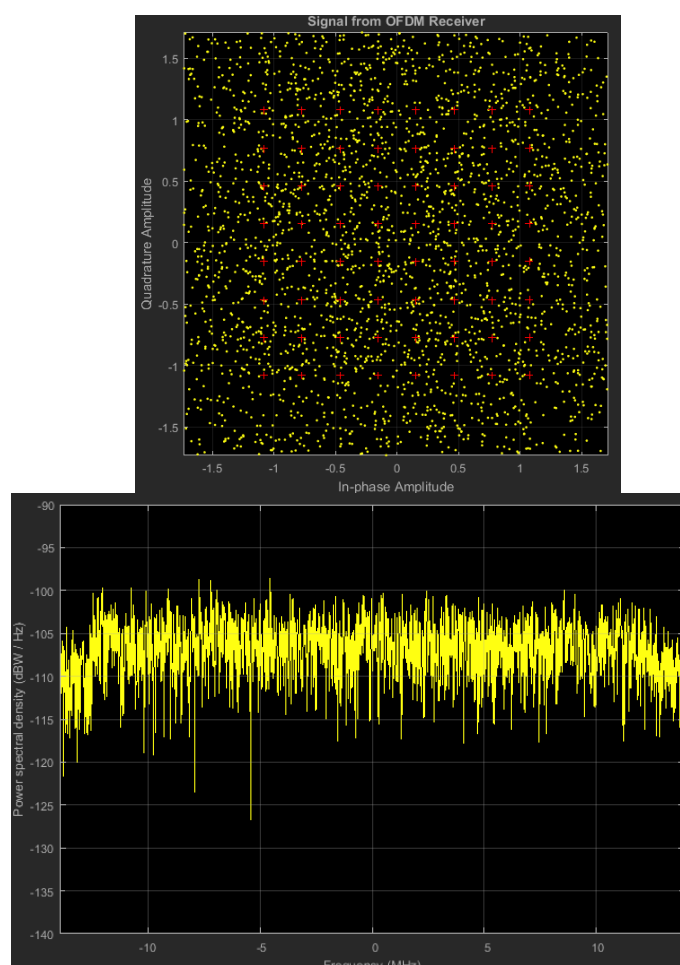


Рис. 5.192. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий QPSK при SNR=1 дБ

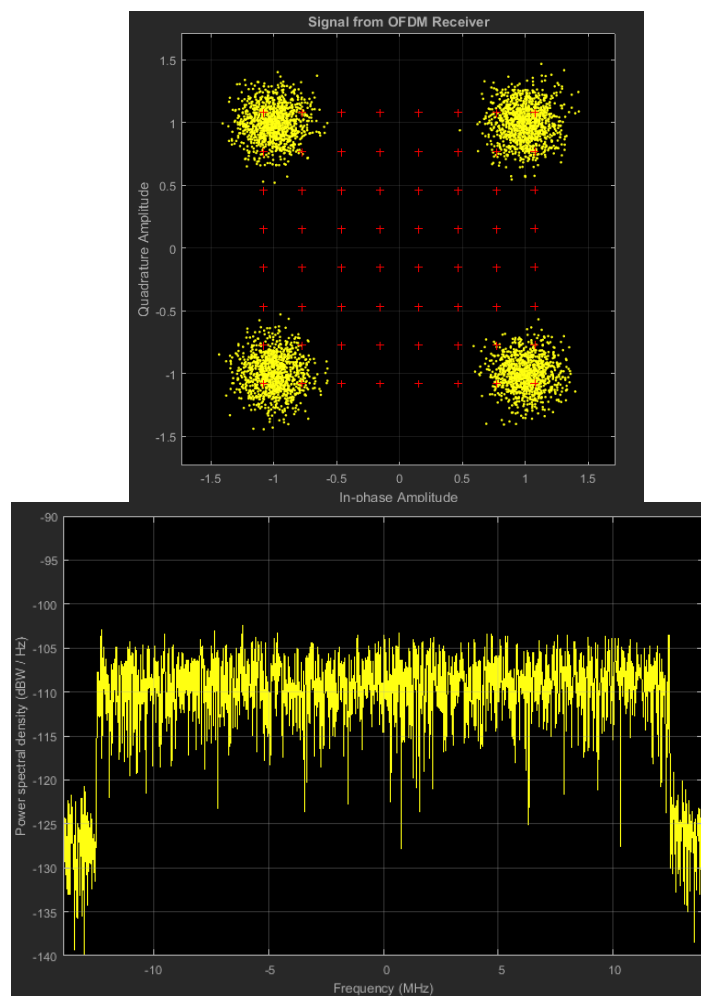


Рис. 5.193. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий QPSK при SNR=18Б

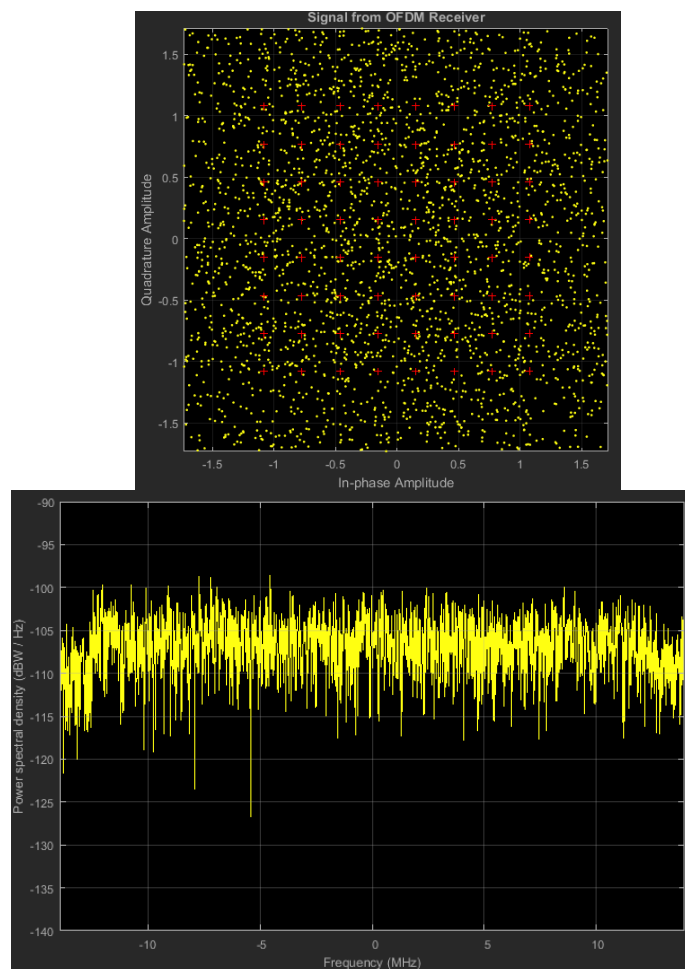


Рис. 5.195. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 16-QAM при SNR=1 дБ

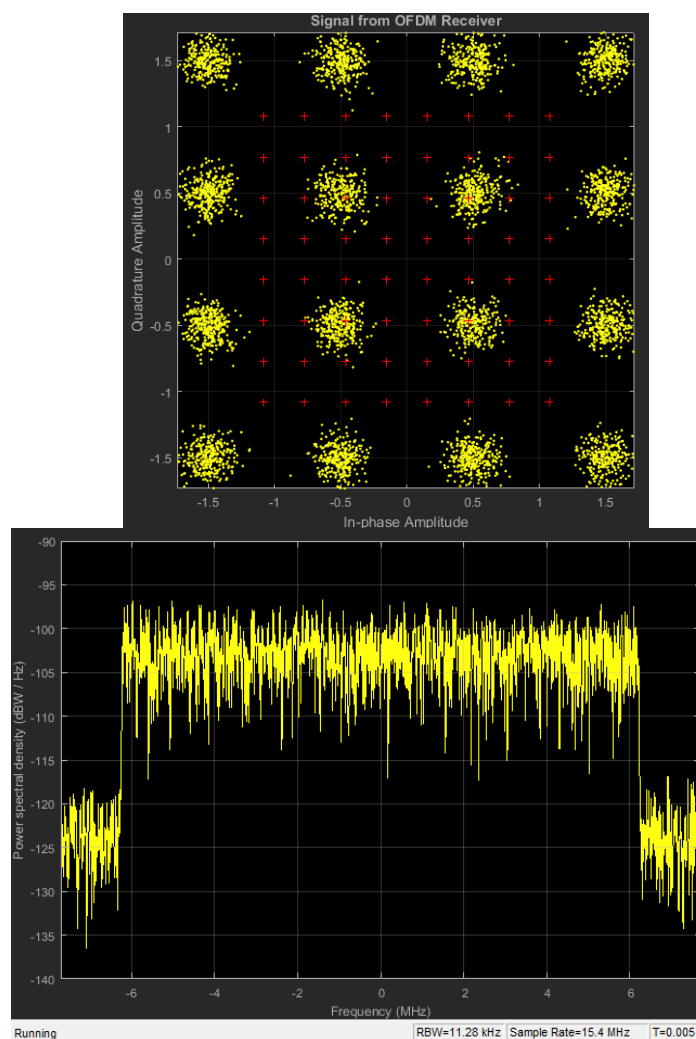


Рис. 5.196. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 16-QAM при SNR=18Б

В процессе выполнения данной лабораторной работы были изучены основные теоретические аспекты системы цифрового мобильного телевизионного стандарта DVB-H

При выполнении практической части работы была построена зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для QPSK и 16-QAM модуляции. Результат представлен в виде графика (рисунок 4.63).

Были сняты изображения спектра OFDM-символа и диаграммы созвездий QPSK и 16-QAM при прохождении сигнала в канале с аддитивным белым гауссовским шумом.

Полученные в результате моделирования данные позволяют сделать вывод о том, что безошибочная передача данных по каналу связи в системе DVB-T возможна при отношении сигнал/шум не менее 18 дБ.

DVB-H является обновлением для основного стандарта, которое решает проблемы мобильного приема. Главное нововведение - timeslicing. Передатчик циклически выдает в эфир пакеты, принадлежащие всем транслируемым каналам по очереди. Передача осуществляется короткими импульсами с использованием

максимальной пропускной способности канала. Приемник включается только в определенные моменты, когда необходимо загрузить очередную порцию видеопотока. Это позволило в 10 раз увеличить продолжительность автономной работы портативных телевизоров. Дело в том, что для приема DVB-T применяются довольно сложные чипы, производятся интенсивные математические вычисления. И когда система работает постоянно, без перерыва, то автономность лучших образцов мобильных устройств достигает 20-40 минут. В свою очередь техника, основанная на DVB-H, способна функционировать до 10 часов от одного заряда батареи.

Другая особенность стандарта - высокая помехоустойчивость за счет введения механизма коррекции ошибок. В обычном DVB-T используется разнесенный прием на несколько антенн, что позволяет системе выбирать наименее поврежденный сигнал. В портативном устройстве такое решение реализовать труднее.

Третья важная особенность - DVB-H основывается на IP-протоколе, а это значительно упрощает и удешевляет построение вспомогательной инфраструктуры. Возможным становится использование готовых, недорогих программных решений.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В учебном пособии рассмотрены основы системотехники и проектирования радиотехнических систем (РТС). Основы системотехники и системного анализа рассматриваются на базе первооткрывателей инженерной системотехники Г.Гуд, Р.Макол и Ф. Темникова. Используются идеи томских ученых Ф.И. Перегудова и Ф.П. Тарасенко.

На примерах анализа РТС рассмотрены базовые критерии эффективности РТС. Приведены примеры проектирования систем передачи информации. Рассмотрены вопросы проектирования перспективных спутниковых систем.

Представлены компьютерный практикум и компьютерные лабораторных работы для исследования современных систем на базе MATLAB Simulink модемов и кодеков современных телекоммуникационных систем стандарта CDMA, системы мобильной связи стандарта IEEE 802.11 (WiFi), мобильной связи стандарта IEEE 802.15.4 ZigBee, системы мобильной связи стандарта IEEE 802.15.1 (Bluetooth), системы мобильной связи стандарта IEEE 802.16 (WiMAX), системы мобильной связи стандарта IEEE 802. 20 LTE, системы цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T, системы цифрового спутникового телевизионного вещания DVB-S и системы высокоскоростного цифрового спутникового ТВ-вещания DVB-S2, системы цифрового кабельного телевизионного вещания DVB-C и системы высокоскоростного цифрового кабельного ТВ-вещания DVB-C2, системы цифрового мобильного телевизионного



вещания DVB-H и системы высокоскоростного цифрового мобильного ТВ-вещания DVB-H2.

Получены основные характеристики ТКС в зависимости от параметров систем, характеристик сигналов и влияния шумов и многолучевости (для CDMA). Представлены созвездия для модуляторов, спектры сигналов на входе и выходе канонической связи, а также зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум и многолучевости.

Материалы учебного пособия могут быть использованы как для учебных целей, так и как справочный материал при проектировании ТКС - представлен курс лекций и компьютерный практикум для каждой из проектируемых защищенных систем.

В приложении даны задания на самостоятельную работу: 1. Оптимизация методов помехоустойчивого кодирования в телекоммуникационных системах. Проведен анализ этапов проектирования РТС, а также вопросы организации НИОКР современных РТС.

К учебному пособию прилагается CD-диск с программным обеспечением для всех комплексов, включенных в пособие, а также пакетами MATLAB и NI LabVIEW со всем установочным ПО. Программные комплексы позволят читателю самостоятельно провести моделирование для РТС со своими характеристиками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Витерби А. Д., Омура Дж. К. Принципы цифровой связи и  
2. , 2012. – 401 стр.
3. Морелос- кодирования /Пер. с англ. под ред. К. Ш. Зигангирова. –  
М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.
4. Г.В. Мамчев . Цифровое телевизионное вещание: Учебное пособие.  
– Новосибирск: СибГУТИ Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого  
кодирования. Методы, алгоритмы, применение / пер. с англ. В. Б.  
Афанасьева. – М.: Техносфера, 2006 г. – 320 с.
5. Алгоритм Витерби [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм\\_Витерби](https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Витерби) (Дата обращения  
25.10.2016)
6. Декодирование сверточных кодов по максимуму правдоподобия.  
Алгоритм Витерби [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<http://k14.spb.ru/cm/uploads/109/004> (Дата обращения 27.10.2016)

6. Bulyakulov R.R. The adaptive threshold device // Processing of the 2014 IEEE North West Russia Section Young Researches in Electrical and Electronic Engineering Conference. P.165. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448237
7. Бакулев, П.А. Радиолокационные системы. Учебник для ВУЗов / П.А. Бакулев; М.: Радиотехника, 2004. – 46 с.
8. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич; М.: Энергия, 1969
9. Богатырев, А.А. Стандартизация статистических методов управления качеством / А. А. Богатырев, Ю. Д. Филиппов; М.: Изд-во стандартов, 1989. – 42 с.
10. Храменков, А.С. Сопоставительный анализ радиолокационных обнаружителей, основанных на критерии неймана-пирсона и последовательном критерии отношения вероятностей / А.С. Храменков, С.Н. Ярмолик // доклады БГУИР №6(76) Минск, 2013.
11. Васильев, К.К. Методы обработки сигналов: Учебное пособие / К.К. Васильев; Ульяновск, 2001.
12. Акулиничев Ю.П., А.М.Голиков. Анализ эффективности пеленгования сканирующих по углу источников СВЧ излучения на загоризонтных морских трассах// Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. Том 4. Радиотехнические системы и распространение радиоволн. Сборник трудов. Томск: 2000. С. 171-182.
13. Акулиничев Ю.П., Голиков А.М., Елисеенко А.В., Морозов А.И. Свойства загоризонтных тропосферных каналов, содержащих разнесенные в пространстве и остронаправленные антенные системы. //15 Всесоюзная конф. по распространению радиоволн. Тез. докл. Ч.2. -Алма-Ата.: Наука, 1987. - с.309.
14. Акулиничев Ю.П., Голиков А.М., Мещеряков А.А. Статистическая модель искажений диаграмм направленности антенн на загоризонтных трассах в тропосфере и ее экспериментальная проверка. //16 Всесоюзная конф. по распространению радиоволн. Тез. докл. Ч.2. - Харьков: АН СССР, 1990. - с.73.
15. Акулиничев Ю.П., Голиков А.М, Стракевич Л.Г. Оценка формы функции пространственной когерентности по сигналам сканирующего источника. //Областная научно-техническая конф. Тезисы докл. - Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987. - с.48.
16. Акулиничев Ю.П., Голиков А.М. О потерях усиления направленных антенн в линии. //Областная научно-техническая конф. Тезисы докл. - Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987. - с.53
17. Акулиничев Ю.П. Коэффициенты передачи загоризонтной тропосферной линии при движении, сканировании и разнесении антенн. //Радиотехника, 1991, №12. с.71 - 75.

18. Акулиничев Ю.П., Голиков А.М. Анализ корреляционных характеристик случайно-неоднородных каналов при комплексном разнесении источников и приемников. //Радиотехника и электроника, 1987, т.32, Вып.8, с.1646 -1654.
19. Акулиничев Ю.П., Голиков А.М. Предельная форма функции когерентности поля в слоисто-неоднородной среде. //Оптика атмосферы, 1990, Т3, №10, с. 969 - 971.
20. Akulinichev Yu.P., Golikov A.M., Sharygin G.S. Wave scattering from moving turbulence and wind velocity measurements. //Journal of atmospheric and terrestrial physics ( Great Britain), 1996, v.58, N8/9, p.1039 - 1045.
21. Шарыгин Г .С. Статистическая структура поля УКВ за горизонтом. - М.: Радио и связь, 1983. - 140 с.
22. Златин И.Л. System View 6/0 (System Vue™) – системное проектирование радиоэлектронных устройств. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 424 с.
23. Зябликов С.Ю., Алыбин В.Г., Антонов Ю.Н., Зильберг М.Б., Сизякова А.Ю. Трофилеев А.А. Оптимизация передатчика спутникового ретранслятора по критерию минимума вероятности ошибки демодуляции сигнала //Радиотехника, 2011. №9.
24. . Зябликов С. Ю., Алыбин В. Г., Антонов-Антипов Ю. Н., Зильбер М. Б., Сизякова А.Ю., Трофилеев А. А. Расчёт характеристик нисходящей линии связи спутникового ретранслятора с транзисторным усилителем мощности // Crimean Conferenc “Microwaveй& Telecommunication Technology” 2010, 13-17 September, Sevastopol<http://www.telecomnetworks.ru/support/description/dvbrcs/> – Спутниковые и телекоммуникационные системы.
25. Скляр Бернанд Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2.-е, испр.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
26. <http://patft.uspto.gov> Matthew P. Donadio. CIC filter introduction. – бр.
27. Голиков А.М., Кожин А.М. Модель адаптивной двухсторонней широкополосной спутниковой системы передачи данных для магистрального газопровода "Сила Сибири" на базе геостационарных КА "Ямал-401", Институт нефти и газа, 26 апреля 2017 г., г. Красноярск.
28. Голиков А.М., Кожин А.М. Модель двухсторонней широкополосной спутниковой системы передачи данных. // Современные проблемы радиоэлектроники / сб. науч. тр. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. С. 229 - 232, ISBN 978-5-7638-3646-2
29. . Голиков А.М., Кожин А.А., Медведев М.Д., Дудкин Д.В., Карпачев К.Д., Лемешевский А.А. Модель двусторонней широкополосной спутниковой системы связи VSAT. Радиотехника, электроника и связь // Сборник докладов IV Междун. Конф. (РЭиС 2017), г.Омск, 15-16 ноября 2017, ISBN 978-5-99090318-4-8

30. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. Учебное пособие для вузов / Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев и др.; Под редакцией В.Н. Гордиенко и М.С. Тверецкого. - М.: Горячая линия - Телеком, 2008. - 392 с.
31. Росляков А.В., Самсонов М.Ю., Шибаета И.В. IP-телефония. – М.: Эко-Трендз, 2003.-250с.
32. Жданов А. Г., Смирнов Д. А., Шипилов М. М. Передача речи по сетям с коммутацией пакетов (IP-телефония). - СПб, 2001. – 148с.
33. Гольдштейн Б. С., Пинчук А. В., Суховицкий А. Л. IP-телефония. - М.: Радио и связь, 2001.-336с.
34. Гольдштейн Б.С., Зарубин А.А., Саморезов В.В., Протокол SIP, Справочник., - СП.: БХВ, 2005.-456с.,
35. IPТор. Протокол инициирования сеансов связи - SIP. [Электронный ресурс]/ – Режим доступа: <http://www.iptop.net/sip/>. Дата обращения: 1.04.2014.
36. Официальный сайт компании ОАО «ИнфоТеКС». ViPNetOFFICE. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: [http://infotecs.ru/products/catalog.php?SECTION\\_ID=&ELEMENT\\_ID=411](http://infotecs.ru/products/catalog.php?SECTION_ID=&ELEMENT_ID=411)
37. ОАО "Инфотекс", Москва, Россия. Межсетевой экран / ViPNet Office Firewall / Руководство администратора.
38. <http://web-in-learning.blogspot.ru/2012/02/openmeetings.html> (дата запроса 31.10.2015)
39. [http://old.stel.ru/videoconference/tech\\_vc/podrobno/vks-management.php](http://old.stel.ru/videoconference/tech_vc/podrobno/vks-management.php) (дата запроса 31.10.2015)
40. <http://wiki.first-leon.ru/index.php/OpenMeetings> (дата запроса 31.10.2015)
41. <https://ru.wikipedia.org/wiki/видеоконференция> (дата запроса 31.10.2015)
42. Современные методы и средства управления в сетях видеоконференцсвязи / М.В. Виноградов – 2013. стр. 7
43. Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, В.П. Ходненко. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2010 г. Т. 114. С. 15-26. [Электронный ресурс] режим доступа к сайту: <http://jurnal.vniiem.ru/>.
44. Фатеев В.Ф. Малые космические аппараты информационного обеспечения//Перспективные сети передачи данных.//Москва “Радиотехника” 2010г с 191.
45. Банкет В.Л. Помехоустойчивое кодирование в телекоммуникационных системах: учебн. пособие. - Одесса: ОНАС им А.С. Попова, 2011. - 104 с.

46. Банкет В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. - Одесса: Фешкс, 2009. - 180 с.
47. Мелихов С.В. Аналоговое и цифровое радиовещание: Учебное пособие. Издание второе, исправленное. - Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 233 с.
48. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: Учебное пособие. - СПб. : Издательство "Лань", 2018. - 452 с. ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-2748-2
49. Скляр Б. Цифровая связь. — М.: Издательский дом Вильямс. 2003 — 1104с
50. Феер К.: Беспроводная цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. - 520 с.
51. Крейнделин В.Б., Колесников А.В. Оценивание параметров канала в системах связи с ортогональным частотным мультиплексированием. Учебное пособие / МТУСИ.-М., 2010. -29 с.
52. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) Москва: техносфера, 2012. – 1008 с.
53. Майков, Д.Ю. Оценка сдвига частоты для процедуры Initial Ranging в системе «мобильный WiMax» / Д.Ю. Майков, А.Я. Демидов, Н.А. Каратаева, Е.П. Ворошилин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – №2 (24). – 59-63 с.
54. Серов А. В. Эфирное цифровое телевидение DVB-T/H. - БХВ-Петербург, 2010. – 465 с.
- 55 . Стандарт DVB-H. Система мобильного ТВ вещания. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/tech.php?id=dvvh>
- 56 [http://www.mathworks.com/examples/simulink-communications/mw/comm\\_product-LTEDownlinkExample-lte-phy-downlink-with-spatial-multiplexing](http://www.mathworks.com/examples/simulink-communications/mw/comm_product-LTEDownlinkExample-lte-phy-downlink-with-spatial-multiplexing)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЗАДАНИЯ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

### Оптимизация методов помехоустойчивого кодирования для телекоммуникационных систем

Помехоустойчивое кодирование является эффективным способом оптимизации ТКС. На практике инженеру проектировщику ТКС приходится решать задачи оптимизации на основе численных расчетов и соответствующего сравнения методов помехоустойчивого кодирования и выбора конкретных методов и соответствующим им кодов. Решение именно такой задачи положено в основу СР [1].

*Исходные данные* заданы в таблице вариантов П1.2:

1. Цифровая информация передается двоичным кодом. Виды передаваемой цифровой информации:

ДК - данные компьютерного обмела;

ЦТЛФ - цифровая телефония;

ЦТВ - сообщения цифрового ТВ;

ЦЗВ - сообщения цифрового звукового вещания.

2. Канал святи - канал с постоянными параметрами и аддитивным белым гауссовым шумом.

3. Отношение с/ш на входе демодулятора  $h_0 = E_0 / N_0$ .

4. Методы модуляции: ФМ-2, ФМ-4.

5. Прием - когерентный.

6. Производительность источника  $R_{ист}$  (бит/с).

7. Полоса пропускания канала  $F_K$  (кГц).

8. Вероятность ошибки бита в сообщениях, отдаваемых получателю, не более  $p$ .

9. Допустимая сложность декодера СК (показатель сложности решетки кода) - не более  $W$ .

Необходимо:

1. Выбрать и обосновать выбор корректирующего кода для проектируемой ТКС, обеспечивающего требуемую вероятность ошибки бита  $p$  в сообщениях, отдаваемых получателю, при условии выполнения следующих *ограничений*:

1.1. Полоса частот кодированного сигнала не должна превышать полосу пропускания канала  $F_K$ .

1.2. При использовании сверточных кодов показатель сложности решетки кода должен быть не более величины  $W$ .

2. Разработать и дать подробное описание структурной и функциональных схем кодера и декодера выбранного кода и обосновать их параметры.

3. Проанализировать показатели энергетической и частотной эффективности телекоммуникационной системы и сравнить их с предельными значениями эффективности.

4. Сделать *заключение* по выполненной работе.

**Содержание** пояснительной записки работы:

1. Задание и исходные данные.
2. Описание структурной схемы проектируемой телекоммуникационной системы с указанием мест включения кодера помехоустойчивого кода, модулятора, демодулятора и декодера с подробными пояснениями выполняемых ими функций.
3. Классификация корректирующих кодов по структуре. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков помехоустойчивых блочных и сверточных кодов. Обоснование применения в проекте сверточных кодов.
4. Классификация и сравнительный анализ алгоритмов декодирования сверточных кодов. Обоснование выбора алгоритма Витерби для декодирования СК.
5. Расчет ширины спектра цифрового сигнала с заданным видом модуляции.
6. Расчет ширины спектра кодированного цифрового сигнала с заданным видом модуляции в зависимости от скорости кода.
7. Определение допустимой скорости кода  $R_{КОД}^*$  из условия *непревышения* полосой частот кодированного сигнала полосы пропускания канала (ограничение 1.1).
8. Определение перечня кодов со скоростями, превышающими допустимую скорость  $R_{КОД}^*$ , которые могут быть использованы для решения поставленной задачи.
9. Выбор СК из этого перечня, обеспечивающего заданную вероятность ошибки бита (условие 1) и удовлетворяющего требованию ограничения по сложности декодера (ограничение 1.2).
10. Проверочный расчет зависимости вероятности ошибки на выходе декодера выбранного СК.
11. Разработка и описание структурных и функциональных схем кодера и декодера выбранного СК.
12. Заключение с подведением итогов выполненной работы.
13. Список использованных источников.

Методические указания к выполнению КР

Расчет ширины спектра сигнала ФМ-2 (ФМ-4) следует производить по рекомендациям материалов главы 1. Применение корректирующих кодов со скоростью  $R_{КОД}^*$  приводит к расширению спектра кодированного сигнала в  $(K_F = 1/R_{КОД}^*)$  раз. С другой стороны, корректирующая способность кода возрастает с уменьшением

скорости кода (т.е. с увеличением избыточности). Поэтому *задача оптимизации* параметров корректирующего кода состоит в выборе кода со скоростью, при которой ширина спектра кодированного сигнала *не превышает заданную полосу пропускания канала*. Если требуемая полоса пропускания канала для передачи ФМ сигнала с информационной скоростью  $R_{ИСТ}$  равна  $F_{(ФМ)}$ , а скорость кода выбрана равной  $R_{КОД}$ , то полоса пропускания канала, необходимая для передачи кодированного ФМ сигнала, будет равна

$$F_{K(ФМ-СК)} = \frac{F_{(ФМ)}}{R_{КОД}}.$$

Тогда из условия неперевышения этой полосой частот сигнала полосы пропускания канала ( $F_{K(ФМ-СК)} < F_K$ ) получаем простое *условие для выбора скорости кода*

$$R_{КОД}^* > R_{КОД} = \frac{F_{(ФМ)}}{F_K}. \quad (П1.1)$$

Сказанное иллюстрируется рисунком 5.1. Ширина спектра кодированного ФМ сигнала пропорциональна коэффициенту расширения полосы. По мере снижения скорости кода (возрастания  $K_F$ ) полоса расширяется и достигает значения полосы пропускания канала. На этом же рисунке показана зависимость АЭВК от  $K_F$  (что равноценно скорости кода). Пересечение кривой полосы с граничным заданным значением  $F_K^*$  определяет допустимое значение коэффициента расширения полосы пропускания канала  $K_p = 1/R_{КОД}$  и, соответственно, скорость кода  $R_{КОД}^*$ . Первым этапом выбора корректирующего кода является выбор класса кодов (класс блоковых либо непрерывных (сверточных) кодов). Используя материалы разделов 8 и 11, рекомендуется *аргументированно обосновать выбор класса сверточных кодов* для применения в своей работе. Среди алгоритмов декодирования СК по широте практического применения *лидирующее место* занимает алгоритм Витерби. Рекомендуется в работе применить именно алгоритм Витерби. В разделе проекта с обоснованием применения этого алгоритма следует привести сведения о сложности реализации алгоритма. Среди кодов, отобранных по критерию скорости в соответствии с формулой (5.1), могут оказаться коды с различной длиной кодового ограничения (и, соответственно, с различной сложностью декодера). Помехоустойчивость декодирования СК характеризуется величиной ЭВК. В таблицах кодов не приводятся значения ЭВК при определенном уровне вероятности ошибки декодирования. В то же время, величина асимптотического энергетического выигрыша (АЭВК) является верхней оценкой ЭВК. Поэтому при отборе кодов рекомендуется использовать величины АЭВК, значения которых имеются в таблицах приложения А. Среди

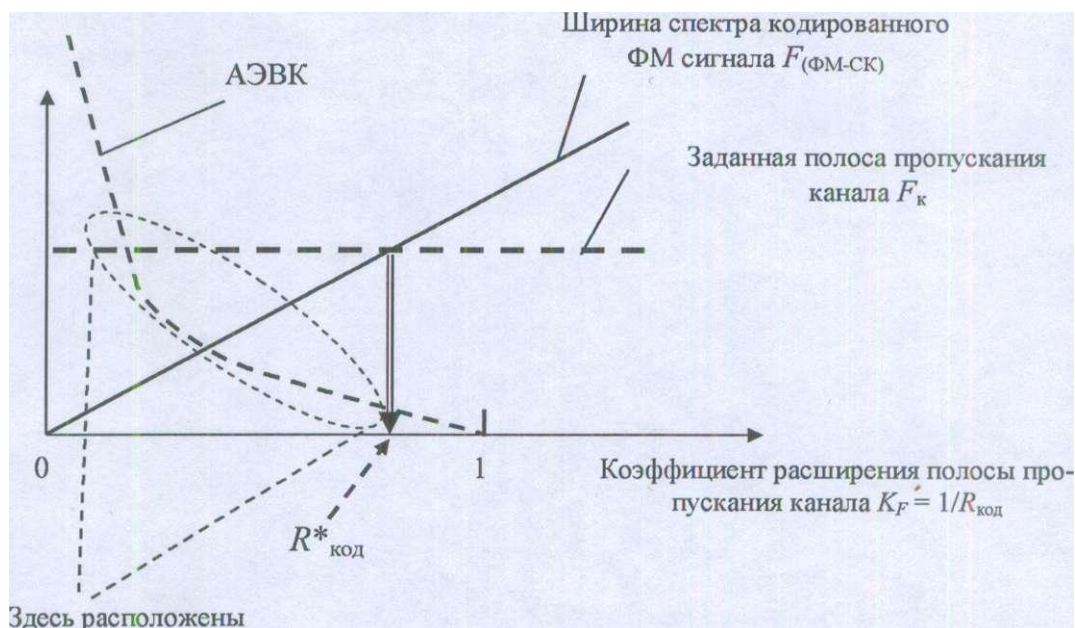


отобранных кодов-кандидатов следует применить код, обеспечивающий максимальный АЭВК и удовлетворяющий требованиям по скорости и сложности декодера. Окончательные данные о вероятности ошибки на выходе декодера следует получить на основе расчетов зависимости вероятности ошибки декодирования от отношения сигнал/шум для выбранного кода. В случае невыполнения требований задания рекомендуется применить код с большей величиной АЭВК.

Пример расчетов и процедуры оптимизации кода

Исходные данные:

1. Вид передаваемой цифровой информации - ЦТЛФ.
3. Отношение с/ш  $h_0 = 4$  дБ.
4. Метод модуляции: ФМ-4.
5. Прием-когерентный.
6. Производительность источника  $R_{ист} = 64$  кбит/с
7. Ширина полосы частот канала  $F_K = 100$  кГц.
8. Допустимая вероятность ошибки бита  $p = 10^{-5}$ .
9. Допустимая сложность решетки кода  $W = 150$ .



коды-кандидаты на выбор

Рис. П1.1. К процедуре оптимизации кода

1. Расчет полосы пропускания канала связи, необходимой для передачи цифровой информации с заданной скоростью методом ФМ-4, производим по формуле

$$F_{(\text{ФМ-4})} = [R_{ист}(1 - \alpha)]/2, \quad \text{где } \alpha - \text{коэффициент ската спектра. Задаваясь значением } \alpha = 0,4, \text{ получаем } F_{(\text{ФМ-4})} = [64(1 - 0,4)]/2 = [64(1 + 0,4)]/2 = 44,8 \text{ кГц.}$$

2. В соответствии с формулой (5.1) определяем предельное значение скорости  $R_{КОД}$

$$R_{КОД}^* > \frac{F_{ФМ-СК}}{F_K} = \frac{44,8}{100} = 0,448.$$

3. По таблицам СК отбираем коды, удовлетворяющие требованию по скорости. Данные об этих кодах сведены в таб. П1.1.

Таблица П1.1. Характеристики СК для выбора кода

Скорость кода $R_{КОД}$	Порождающие многочлены	ДКО $\nu$	Сложность решетки $W$	АЭВК дБ
1/4	463,535,733,745	8	512	8,29
1/3	557,663,711	8	512	7,78
1/2	53,75	5	64	6,02
1/2	61,73	5	64	6,02
1/2	71,73	5	64	6,02
1/2	133,171	6	128	6,99
1/2	247,371	7	256	6,99

Из таблицы видно, что для выполнения поставленной задачи могут быть использованы СК со скоростями  $R_{КОД} = 1/2$ , которые обеспечивают достаточно большой АЭВК. На основе данных таблицы выбираем для проекта код с порождающими многочленами (133, 171), который при скорости  $R_{КОД} = 0,5$  обеспечивает АЭВК = 6,99 дБ. Данные расчета вероятности ошибки приведены в главе 1.

Видно, что применение выбраного кода обеспечивает выполнение задания: при отношении сигнал/шум  $h_0^2 = 4$  дБ вероятность ошибки декодирования менее  $3 \cdot 10^{-5}$ . Сравнение с кривыми помехоустойчивости некодированной ФМ (рис. 11.1) показывает, что при вероятности ошибки  $p = 10^{-5}$  этот код обеспечивает ЭВК 5,3 дБ.

Таблица П1.2. Исходные данные для выполнения СР

Номер варианта для выполнения СР должен соответствовать номеру фамилии студента в журнале академической группы							
Номер варианта	Вид перед. информ.	Отношение С/Ш на входе $h_0^2$ , дБ	Метод модуль.	Производит. источника	Полоса пропуск. канала	Вер. ошибки бита $p$	Сложн. декодера $W$

				$R_{ист}$ , кбит/с	$F_K$ , кГц		
1	ДК	4,0	ФМ-4	64	80	$10^{-6}$	150
2	ЦТЛФ	5,0	ФМ-4	16	25	$10^{-4}$	160
3	ЦЗВ	6,0	ФМ-2	256	800	$10^{-5}$	170
4	ДК	6,5	ФМ-2	64	200	$10^{-6}$	180
5	ЦТЛФ	4,0	ФМ-4	16	25	$10^{-4}$	250
6	ЦЗВ	7,0	ФМ-4	128	200	$10^{-5}$	350
7	НТВ	5,0	ФМ-2	2400	7000	$10^{-8}$	560
8	ДК	6,0	ФМ-4	32	50	$10^{-6}$	200
9	ЦТЛФ	5,0	ФМ-2	24	70	$10^{-4}$	300
10	ЦЗВ	4,5	ФМ-4	256	400	$10^{-5}$	250
11	ЦТВ	5,5	ФМ-2	3000	1200	$10^{-8}$	550
12	ДК	4,0	ФМ-4	48	70	$10^{-6}$	150
13	ЦТЛФ	5,0	ФМ-4	32	50	$10^{-4}$	250
14	ЦЗВ	7,0	ФМ-2	256	800	$10^{-5}$	300
15	ЦТВ	4,0	ФМ-4	4500	1300	$10^{-9}$	550
16	ДК	7,0	ФМ-4	56	90	$10^{-6}$	150
17	ЦТЛФ	5,0	ФМ-2	24	70	$10^{-4}$	160
18	ЦЗВ	4,5	ФМ-4	256	400	$10^{-5}$	200
19	ЦТВ	5,5	ФМ-4	5000	1400	$10^{-9}$	550
20	ДК	6,0	ФМ-2	64	200	$10^{-6}$	150
21	ЦТЛФ	7,5	ФМ-4	256	400	$10^{-4}$	250
23	ЦЗВ	6,5	ФМ-4	16	50	$10^{-5}$	150
24	ДК	6,0	ФМ-4	64	150	$10^{-6}$	150
25	ЦГЛФ	4,5	ФМ-2	16	25	$10^{-6}$	200
26	ЦТВ	5,0	ФМ-2	6000	16000	$10^{-9}$	550
27	ЦЗВ	6,0	ФМ-4	384	600	$10^{-5}$	250
28	ДК	4,5	ФМ-4	64	100	$10^{-6}$	150
29	ЦГЛФ	5,0	ФМ-2	16	50	$10^{-4}$	250
30	ЦТВ	5,5	ФМ-2	5500	32000	$10^{-9}$	560

31	ЦГЛФ	4,5	ФМ-4	64	200	$10^{-5}$	150
32	ДК	5,0	ФМ-4	64	300	$10^{-5}$	250

### Примеры расчетов для разных вариантов

#### Вариант №7

Таблица П1.3. Параметры проектируемой ТКС

Номер варианта для выполнения индивидуальной работы должен соответствовать номеру фамилии студента в журнале академической группы							
Номер варианта	Вид перед. Информации	Отношение $C/Ш h_b^2$ , дБ	Метод модуляции	Пропускная способность $R_{ист}$ , кбит/с	Пропускная способность канала $F_k$ , кГц	Вероятность ошибки и бита	Сложность декодера
7	ЦТВ	5.0	ФМ-2	2400	7000	$10^{-8}$	560

### Структурная схема проектируемой телекоммуникационной системы

В общем виде обобщенная структурная схема проектируемой ТКС может быть сформирована в виде, представленном на рисунке П1.1.

В передатчике кодер вносит в информационное сообщение избыточность в виде проверочных символов. Закодированные символы поступают на модулятор, который преобразует их в аналоговый сигнал.

В приемнике демодулятор преобразует принятый сигнал в последовательность чисел, представляющих оценку переданных данных – метрики. Метрики поступают в декодер, который исправляет возникающие при передаче ошибки, используя внесенную кодером избыточность [24].

#### Классификация корректирующих кодов

Обнаружение ошибок в технике связи — действие, направленное на контроль целостности данных при записи/воспроизведении информации или при её передаче по линиям связи. Исправление ошибок (коррекция ошибок) — процедура восстановления информации после чтения её из устройства хранения или канала связи.

Для обнаружения ошибок используют коды обнаружения ошибок, для исправления — корректирующие коды (коды, исправляющие ошибки, коды с коррекцией ошибок, помехоустойчивые коды).

В общем виде классификация корректирующих кодов может быть представлена в следующем виде:

1. Блочные коды:
  - 1.1 Линейные коды общего вида;

- 1.1.2 Коды Хемминга;
- 1.2. Линейные циклические коды:
  - 1.2.1 Коды CRC;
  - 1.2.2 Коды BCH;
  - 1.2.3 Коды коррекции ошибок Рида — Соломона;
- 2. Сверточные коды;
- 3. Каскадные коды.

Стоит отметить, что блочные коды, как правило, хорошо справляются с редкими, но большими пачками ошибок, их эффективность при частых, но небольших ошибках (например, в канале с АБГШ), менее высока.

Вместе с этим, сверточные коды эффективно работают в канале с белым шумом, но плохо справляются с пакетами ошибок. Более того, если декодер ошибается, на его выходе всегда возникает пакет ошибок.

Так как в начальных условиях поставленной задачи не были сформулированы требования к методам кодирования, выбор остановился на сверточных кодах. Однако, при проектировании телекоммуникационных систем необходимо четко формировать критерии оптимальности разрабатываемой системы.

#### **Классификация методов декодирования сверточных кодов**

Классификация методов декодирования сверточных кодов имеет следующий вид:

- 1. Алгебраические методы декодирования;
- 2. Вероятностные методы декодирования:
  - 2.1 Алгоритм последовательного декодирования;
  - 2.2 Алгоритм Витерби.

Алгоритм Витерби характеризуется постоянством вычислительной работы, однако сложность декодера Витерби растет, как при переборных алгоритмов, по экспоненциальному закону от длины кодового ограничения сверточного кода.

Так как в данной работе в целях оптимизации проектируемой системы будут использоваться короткие сверточные коды, сложность декодера будет мала, что позволяет использовать алгоритм декодирования Витерби.

#### **Расчет и оптимизация параметров телекоммуникационной системы**

Расчет ширины спектра цифрового сигнала с заданным видом модуляции:

$$F_{\text{ФМ-2}} = \frac{R_{\text{счт}} \cdot (1 + \alpha)}{2} = \frac{2400 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0.4)}{2} = 1.68 \text{ МГц} .$$

Расчет ширины спектра кодированного цифрового сигнала с заданным видом модуляции в зависимости от скорости кода:

$$R_{код*} = \frac{F_{ФМ-2}}{F_k} = \frac{1680 \cdot 10^3}{7000 \cdot 10^3} = 0.24.$$

Следовательно скорость кода должна быть не менее 0.24. Полученный результат позволяет сформировать список подходящих сверточных кодов в виде представленном в таблице П1.4.

Таблица П1.4. Перечень подходящих сверточных кодов

Скорость кода $R_{код}$	Порождающие многочлены	ДКО $\nu$	Сложность решетки $\mathcal{W}$	АЭВК, дБ
1/4	463,535,733,745	8	512	8,29
1/3	557,663,711	8	512	7,78
1/2	53,75	5	64	6,02
1/2	61,73	5	64	6,02
1/2	71,73	5	64	6,02
1/2	133,171	6	128	6,99
1/2	247,371	7	256	6,99

В силу того, критерием оптимальности проектируемой ТКС является простота используемого кодера/декодера, был выбран код /133,171/ с длиной кодового ограничения 7, который при скорости кода 0.5 обеспечивает АЭВК = 6.99 дБ.

Изложенное позволяет рассчитать ширину спектра кодированного цифрового сигнала:

$$F_{ФМ-2+СК} = \frac{F_{ФМ-2}}{R_{код}} = \frac{1680 \cdot 10^3}{0.5} = 3.36 \text{ МГц}$$

Рисунок 6.2 позволяет сделать вывод о том, что применение выбранного кода обеспечивает выполнение поставленной задачи, так как при отношении С/Ш = 5 дБ вероятность ошибки декодирования меньше  $10^{-5}$ .

Сравнение с кривыми помехоустойчивости некодированной ФМ показывает, что при вероятности ошибки  $10^{-8}$  этот код обеспечивает значение ЭВК более 10 дБ.

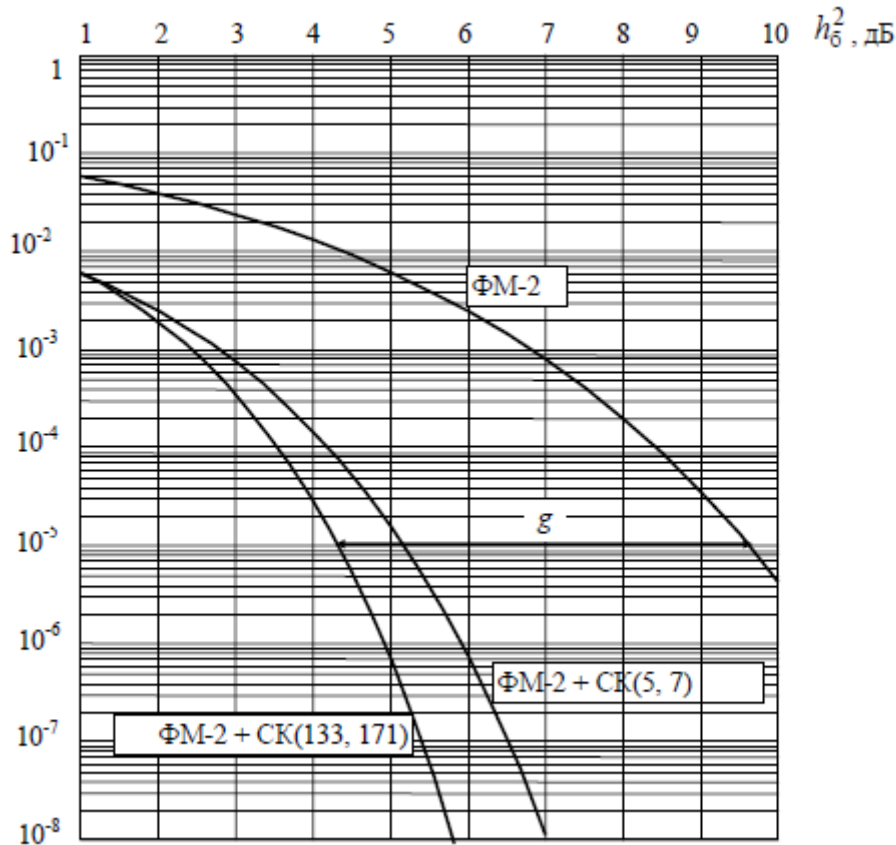


Рис. П1.2. Помехоустойчивость декодирования сверточных кодов

Проверочный расчет вероятности ошибки на выходе декодера:

$$Q = 0.65 \cdot \exp(-0.44 \cdot (z + 0.75)^2) = 0.65 \cdot \exp(-0.44 \cdot (5.01 + 0.75)^2) = 2.972 \cdot 10^{-7}$$

$$P_d = w_{df} \cdot Q \cdot (\sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{код} \cdot h_0^2}) = 36 \cdot 2.972 \cdot 10^{-7} \cdot (\sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0.5 \cdot 5}) = 7.565 \cdot 10^{-5}$$

Расчет показал, что реальное значение вероятности ошибки кодера меньше теоретического значения, следовательно, условия задачи были выполнены.

### Разработка кодера и декодера сверточного кода 133,171

В предыдущем разделе был описан выбор сверточного кодера /133,171/. Функциональная и структурная схема кодера/декодера может быть представлена в следующем виде:

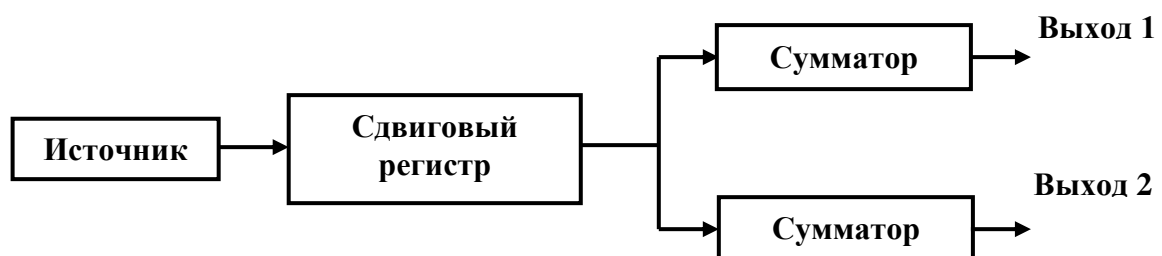


Рис. П1.3. Структурная схема сверточного кодера

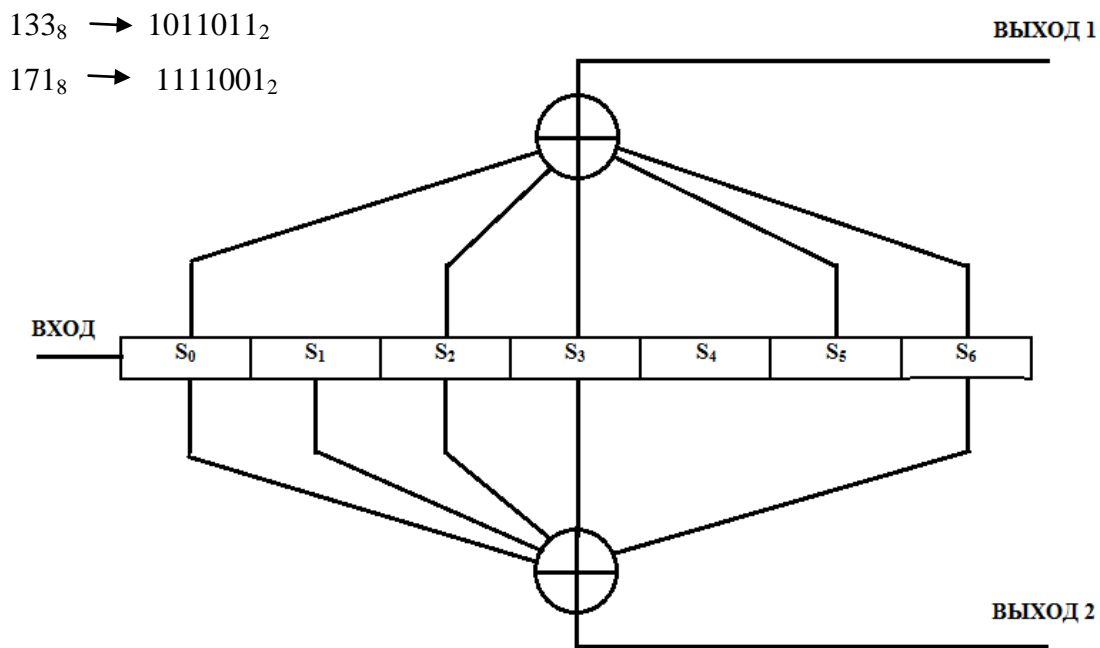


Рис. П1.4. Функциональная схема сверточного кодера 133,171

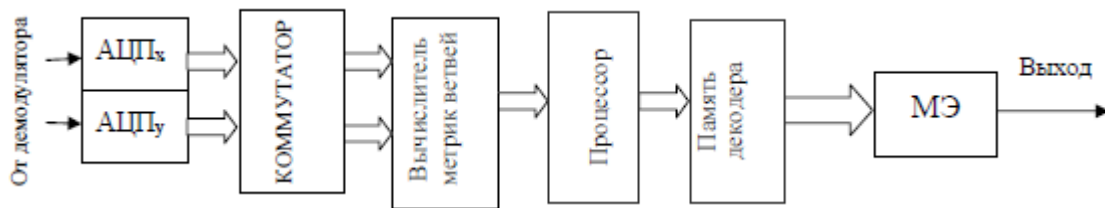


Рис. П1.5. Структурная схема декодера Витерби

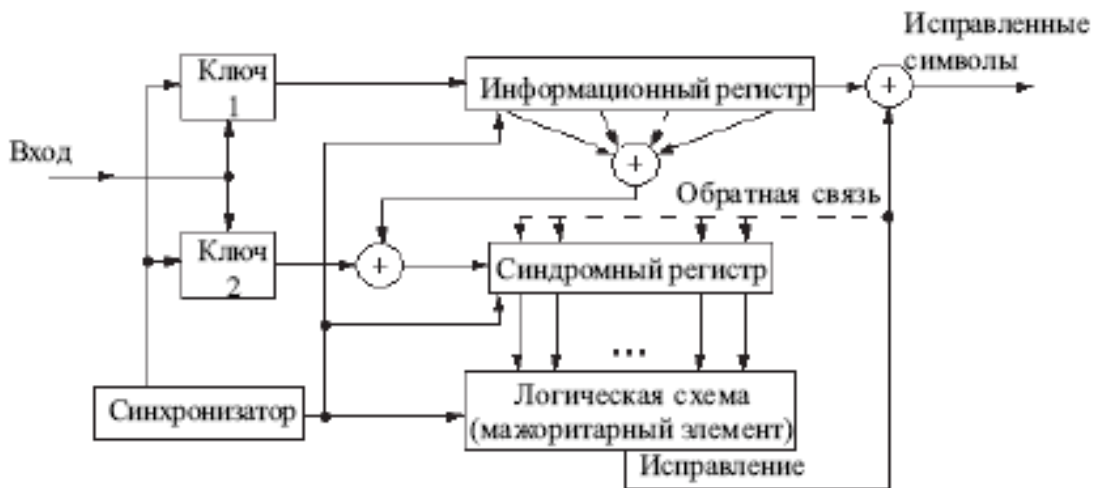


Рис. П1.6. Функциональная схема декодера Витерби

В результате выполнения данной индивидуальной работы было сделано следующее:

1. Спроектирована телекоммуникационная система с использованием сверточного кодера;



2. Рассчитаны и оптимизированы параметры сверточного кода используемого в ТКС в целях повышения ее эффективности и помехоустойчивости;

3. Предложены структурные и функциональные схемы кодера и декодера, используемых в разработанной ТКС.

### Варианты № 16, 3, 8

Для решения поставленной задачи предложены общие параметры проектируемой ТКС, которые представлены в таблице П1.5.

Таблица П1.5. Параметры проектируемой ТКС

Ном ер вариант а	Ви д перед. инф- ии	Отн ошение С/Ш $h_b$ <sup>2</sup> , дБ	Метод модуляци и	Произ в. источника $R_{ист}$ , кбит/с	Пропус кная способность канала $F_k$ , кГц	Вер. ошибки бита $p$	Слож н. декодера $W$
16	Д К	7,0	ФМ-4	56	90	$10^{-6}$	150
3	ЦЗ В	6,0	ФМ-2	256	800	$10^{-5}$	170
8	Д К	6,0	ФМ-4	32	50	$10^{-6}$	200

### Структурная схема проектируемой телекоммуникационной системы

Структурная схема проектируемой телекоммуникационной системы представлена на рисунке П1.2.

Источник сообщения генерирует бинарную последовательность с определенной скоростью  $R_{ист}$ . Курсивом отмечены блоки, которые кодируют и декодируют информацию с применением помехоустойчивых кодов (вводится избыточность при кодировании, например код Хемминга, БЧХ, сверточный код). Что касается источника, то он кодируется и декодируется с помощью таких алгоритмов как, Хаффмана, Шеннона-Фано или Лемпела-Зива. В данных алгоритмах не вводится избыточность. Помимо кодирования система связи содержит в себе квадратурную модуляцию/демодуляцию. Где на выходе модулятора мы получаем сначала комплексные числа (квадратурные и синфазные составляющие), которые в свою очередь садятся на несущие, сдвинутые на 90 градусов и в конечном итоге суммируются. Демодуляция представляет собой обратный процесс. Варианты работы содержит в себе модуляцию ФМ-2 или BPSK, которая имеет только два синфазных

значения постоянной амплитуды и фазы 0 и 180 градусов и ФМ-4 или QPSK, которая имеет четыре значения постоянной амплитуды и фазы. И, конечно же, любая система передачи не обходится без воздействия на нее шумов, в канале беспроводной сети (канал связи).

#### 4 Классификация корректирующих кодов

Обнаружение ошибок в технике связи — действие, направленное на контроль целостности данных при записи/воспроизведении информации или при её передаче по линиям связи. Исправление ошибок (коррекция ошибок) — процедура восстановления информации после чтения её из устройства хранения или канала связи.

Для обнаружения ошибок используют коды обнаружения ошибок, для исправления — корректирующие коды (коды, исправляющие ошибки, коды с коррекцией ошибок, помехоустойчивые коды).

Преимущества и недостатки блочных кодов:

Блочные коды, как правило, хорошо справляются с редкими, но большими пачками ошибок, их эффективность при частых, но небольших ошибках (например, в канале с АБГШ), менее высока.

Преимущества и недостатки сверточных кодов:

Сверточные коды эффективно работают в канале с белым шумом, но плохо справляются с пакетами ошибок. Более того, если декодер ошибается, на его выходе всегда возникает пакет ошибок. Выбор в индивидуальной работе сверточных кодов обосновывается тем, что сверточное кодирование — очень простая операция. Кодирование сверточным кодом производится с помощью регистра сдвига, отводы от которого суммируются по модулю два. Таких сумм может быть две (чаще всего) или больше.

Классификация корректирующих кодов по структуре представлена на рисунке в.

#### **Классификация методов декодирования сверточных кодов**

Классификация методов декодирования сверточных кодов имеет следующий вид:

3. Алгебраические методы декодирования;
4. Вероятностные методы декодирования:
  - 4.1 Алгоритм последовательного декодирования;
  - 4.2 Алгоритм Витерби.

Задача декодирования сверточного кода заключается в выборе пути (в этом и состоит отличие декодирования сверточных кодов) вдоль решетки наиболее похожего на принятую последовательность. Каждый путь вдоль решетчатой диаграммы складывается из ветвей соединяющих узлы. Каждой ветви решетки соответствует кодовое слово из двух бит. Каждую ветвь на каждом периоде можно пометить

расстоянием Хемминга между полученным кодовым словом и кодовым словом, соответствующим ветви. Складывая расстояния Хемминга ветвей, составляющих путь, получим метрику соответствующего пути. Данная метрика будет характеризовать степень подобия каждого пути принятой последовательности. Чем меньше метрика, тем более похожи путь и принятая последовательность. Таким образом, результатом декодирования будет информационная последовательность, соответствующая пути с минимальной метрикой. Если в одно и то же состояние входят два пути выбирается тот, который имеет лучшую метрику. Такой путь называется выжившим. Отбор выживших путей проводится для каждого состояния. Это не иначе как алгоритм декодирования Витерби и он наиболее эффективный.

#### Расчет ширины спектра цифрового сигнала с заданным видом модуляции

Вариант	Расчеты
16	$F_{ФМ4} = \frac{R_{ист} * (1 + \alpha)}{2} = \frac{56 * (1 + 0,4)}{2} = 39,2 \text{ кГц}$
3	$F_{ФМ4} = \frac{R_{ист} * (1 + \alpha)}{2} = \frac{256 * (1 + 0,4)}{2} = 179,2 \text{ кГц}$
8	$F_{ФМ4} = \frac{R_{ист} * (1 + \alpha)}{2} = \frac{32 * (1 + 0,4)}{2} = 22,4 \text{ кГц}$

#### Определение допустимой скорости кода из условия невыхождения полосы частот кодированного сигнала полосы пропускания канала

Вариант	Расчеты
16	$R_{код*} = \frac{F_{ФМ4}}{F_K} = 0,436$
3	$R_{код*} = \frac{F_{ФМ4}}{F_K} = 0,224$
8	$R_{код*} = \frac{F_{ФМ4}}{F_K} = 0,448$

#### Определение кода

Полученный результат позволяет сформировать список подходящих сверточных кодов в виде, представленном в таблице П1.6.

Таблица П1.6. Характеристики СК для выбора кода

Скорость кода $R_{код}$	Порождающие многочлены	ДКО $\nu$	Сложность решетки $W$	АЭВК, дБ
1/4	463,535,733,745	8	512	8,29
1/3	557,663,711	8	512	7,78
1/2	53,75	5	64	6,02
1/2	61,73	5	64	6,02
1/2	71,73	5	64	6,02
1/2	133,171	6	128	6,99
1/2	247,371	7	256	6,99

Вариант	Условия
16	СК со скоростями 1/2 и сложностью решетки $W$ не более 150
3	Все СК со сложностью решетки $W$ не более 170
8	СК со скоростями 1/2 и сложностью решетки $W$ не более 200

Произведен выбор СК из перечня, обеспечивающего заданную вероятность ошибки бита и удовлетворяющего требованию ограничения по сложности декодера.

Вариант	Выбранный СК
16	Код с порождающими многочленами (133, 171), который при скорости 1/2 обеспечивает АЭВК = 6,99 дБ
3	Код с порождающими многочленами (133, 171), который при скорости 1/2 обеспечивает АЭВК = 6,99 дБ
8	Код с порождающими многочленами (133, 171), который при скорости 1/2 обеспечивает АЭВК = 6,99 дБ

**Расчет ширины спектра кодированного цифрового сигнала с заданным видом модуляции в зависимости от скорости кода**

Вариант	Расчеты
16	$F_{ФМ4+СК} = \frac{F_{ФМ4}}{R_{код}} = \frac{39,2}{0,5} = 78,4 \text{ кГц}$
3	$F_{ФМ2+СК} = \frac{F_{ФМ2}}{R_{код}} = \frac{179,2}{0,5} = 358,4 \text{ кГц}$
8	$F_{ФМ4+СК} = \frac{F_{ФМ4}}{R_{код}} = \frac{22,4}{0,5} = 44,8 \text{ кГц}$

Рисунок П1.7 позволяет сделать вывод о том, что применение выбранного кода обеспечивает выполнение поставленной задачи, так как

Вариант	Отношение С/Ш $h_0^2$ , дБ	Вероятность ошибки декодирования меньше
16	7,0	$10^{-6}$
3	6,0	$10^{-5}$
8	6,0	$10^{-6}$

Сравнение с кривыми помехоустойчивости некодированной ФМ показывает, что

Вариант	Вероятность ошибки	АЭВК, дБ
16	$10^{-6}$	более 10
3	$10^{-5}$	9,4
8	$10^{-6}$	более 10

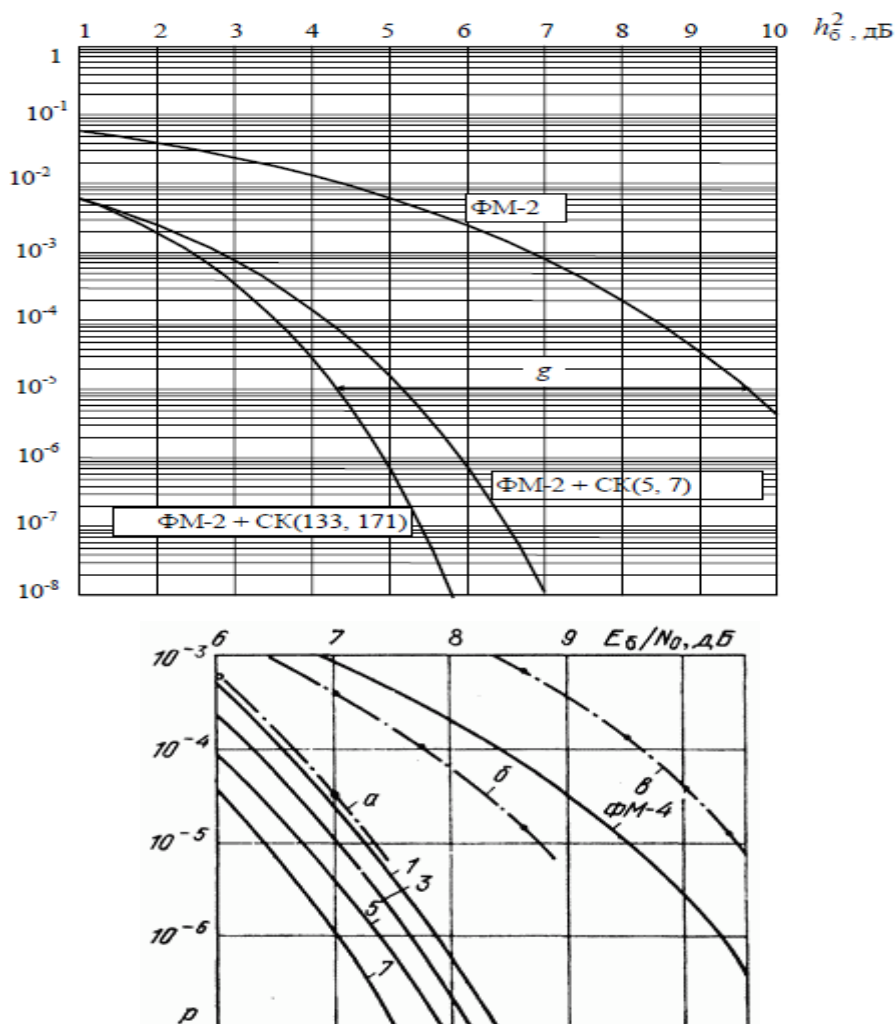


Рис. П1.7. Помехоустойчивость декодирования сверточных кодов

**Проверочный расчет зависимости вероятности ошибки на выходе декодера**

В результате получим (примерно для заданной вероятности ошибки бита):

Вариант	Расчеты
16	$Q = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{5,01 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{5,01^2}{2}\right) = 4,45 \cdot 10^{-5}$ $p_d = w_{df} \cdot Q \cdot \sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{kod} \cdot h_b} = 36 \cdot 4,45 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 7} = 4,2 \cdot 10^{-4}$
3	$Q = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{4^2}{2}\right) = 3,3 \cdot 10^{-5}$ $p_d = w_{df} \cdot Q \cdot \sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{kod} \cdot h_b} = 36 \cdot 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 6} = 9,2 \cdot 10^{-5}$

8	$Q = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{5,01 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{5,01^2}{2}\right) = 4,45 \cdot 10^{-5}$ $p_d = w_{df} \cdot Q \cdot \sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{kod} \cdot h_b} = 36 \cdot 4,45 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 6} = 4,2 \cdot 10^{-5}$
---	--

Расчет показал, что реальное значение вероятности ошибки кодера меньше теоретического значения, следовательно, условия задачи были выполнены.

### Разработка кодера и декодера СК 133, 171

В предыдущем разделе был описан выбор сверточного кодера (133,171).

$$133_8 = 1011011_2; 171_8 = 1111001_2$$

Функциональная и структура схема кодера/декодера может быть представлена в следующем виде:

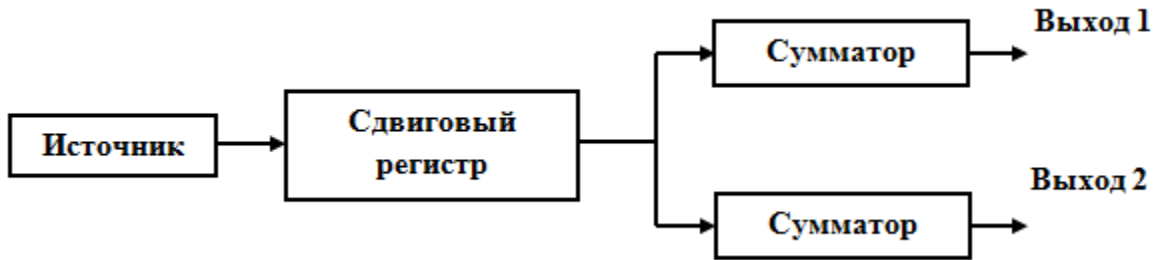


Рис. П1.8. Структурная схема сверточного кодера

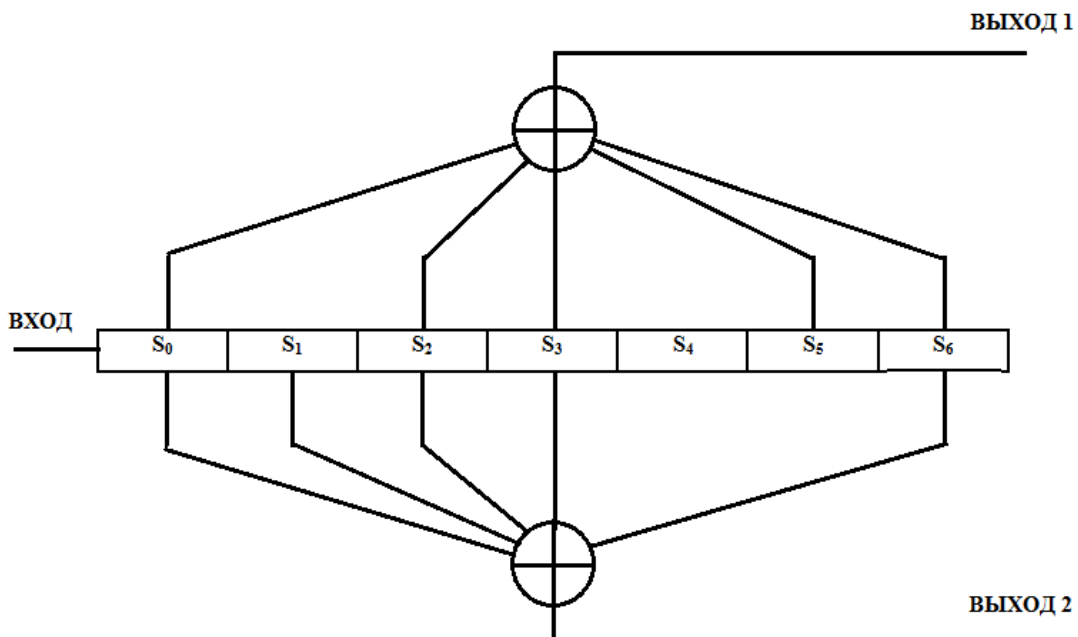


Рис. П1.9. Функциональная схема сверточного кодера 133,171

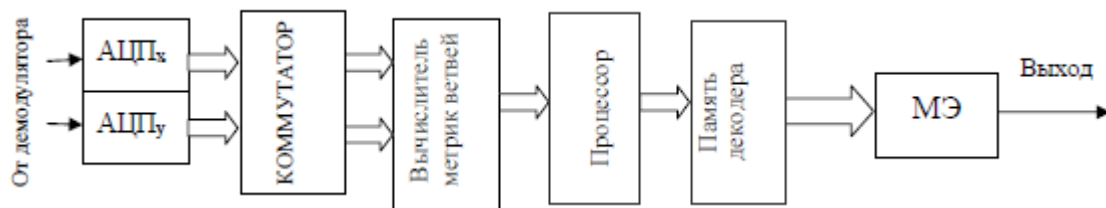


Рис. П1.10. Структурная схема декодера Витерби

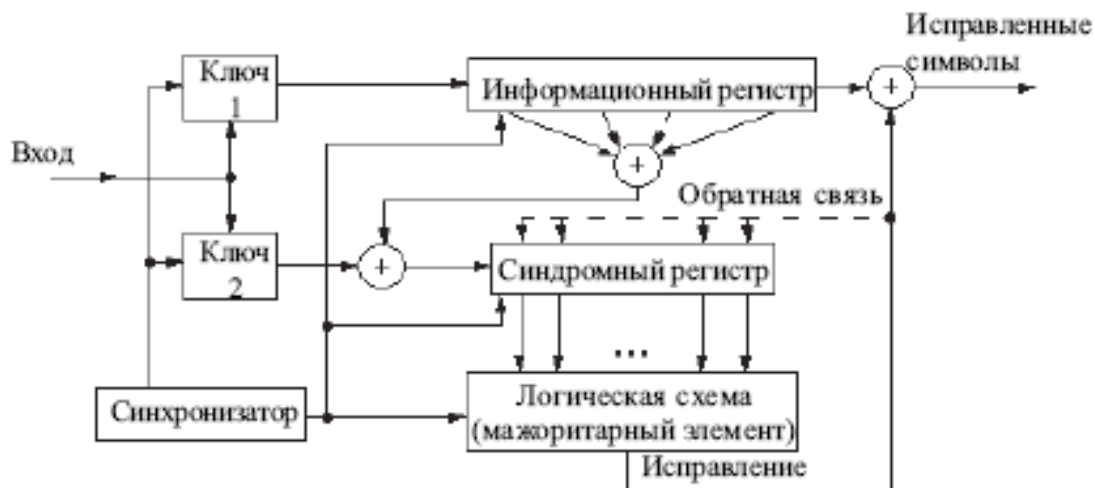


Рис. 5.11. Функциональная схема декодера Витерби

кодера со скоростью 1/2.

В результате выполнения данного индивидуального задания было выполнено следующее:

- Спроектирована телекоммуникационная система с использованием сверточного кодера;
- Рассчитаны и оптимизированы параметры сверточного кода используемого в ТКС в целях повышения ее эффективности и помехоустойчивости при различных начальных заданных условиях (ширина спектра, скорость кода, битовая вероятность ошибки в зависимости от заданного значения отношения сигнал/шум);
- Предложены структурные и функциональные схемы кодера и декодера, используемых в разработанной ТКС.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б: ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ НИР И ОКР РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены основные подходы к планированию и управлению научно-исследовательской и опытно-конструкторской работами. Изложены основы организации НИОКР, проблематика и особенности их проведения. Основное внимание уделено характеристике содержания процесса НИОКР, в том числе процессам их прогнозирования, планирования, управления, контроля и обеспечения.

### **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ**

- АРМ – автоматизированное рабочее место;
- АСНИ – автоматизированная система научных исследований;
- АСП – автоматизированная система планирования;
- АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства;
- АСУ – автоматизированная система управления;
- АСУП – автоматизированная система управления предприятием; АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
- БД – база данных;
- ВВП – валовой внутренний продукт;
- ВТ – военная техника;
- ВП – военное представительство;
- ГК – Гражданский кодекс;
- ГПС – гибкая производственная система;
- ГСИ – Государственная система обеспечения единства измерений;
- ГСС – Государственная система стандартизации;
- ГССБТ – Государственная система стандартов безопасности труда;
- ЕСКД – Единая система конструкторской документации;
- ЕСПД – Единая система программной документации;
- ЕСТД – Единая система технологической документации;
- ЕСТПП – Единая система технологической подготовки производства;
- ИАС – интегрированная автоматизированная система;
- КСАС – Комплекс стандартов на автоматизированные системы; ЛВС – локальная вычислительная сеть; МВИ – межведомственные испытания ; МО – метрологическое обеспечение;
- НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа;
- НИР – научно-исследовательская работа;



НТИ – научно-техническая информация;  
НТП – научно-техническая продукция;  
НТС – научно-технический совет;  
ОИС – объект интеллектуальной собственности;  
ОКР – опытно-конструкторская работа;  
ОНТД – отчетная научно-техническая документация; ОТР – опытно-технологическая работа; ПЗ – представитель заказчика; ПИ – предварительные испытания; ПМ – программа испытаний;  
РИД – результат интеллектуальной деятельности;  
РКД – рабочая конструкторская документация;  
РНТД – результат научно-технической деятельности;  
САПР – система автоматизированного проектирования;  
СИ – средство измерения;  
СПУ – сетевое планирование и управление;  
СРПП – Система разработки и постановки продукции на производство;  
СУБД – система управления базой данных;  
СЧ – составная часть;  
ТД – технологическая документация;  
ТЗ – техническое задание;  
ТУ – технические условия;  
ЧДД – чистый дисконтированный доход;  
ЧПУ – числовое программное управление;  
ЭВМ – электронно-вычислительная машина;  
ЭД – эксплуатационная документация.

Характерной чертой современного развития различных стран является переход к непрерывному инновационному процессу, который становится основным двигателем их экономического роста. Это обусловлено разнообразными причинами, среди которых следует выделить наблюдаемую в современном мире высокую неравномерность темпов экономического роста в различных странах, обострение глобальной конкуренции на рынках наукоемкой продукции, а также бюджетный

дефицит, ограничивающий возможности государственного финансирования научных разработок. Тем не менее, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) занимают все больший вес в инвестициях, превышая в наукоемких отраслях расходы на приобретение оборудования и строительство. Одновременно

повышается значение государственной научно-технической, инновационной и образовательной политики, определяющей общие условия научно-технического прогресса. Интенсивность НИОКР и качество человеческого потенциала определяют сегодня возможности и уровень экономического развития – в глобальной экономической конкуренции выигрывают те страны, которые обеспечивают благоприятные условия для научно-технического прогресса.

Специфика современного высокотехнологичного продукта состоит в его высокой наукоёмкости и требует затрат значительных ресурсов. Получение нового знания становится все более дорогим общественным удовольствием. Поэтому успешность выполнения НИОКР связана с необходимостью учета следующих основных факторов: организационных, научно-технических, производственных. При этом проблема создания новой высокотехнологичной продукции имеет аспекты организации поисковых процедур, получения необходимой информации и прогнозирования, управления и координации, планирования и регулирования, стандартизации и унификации, всестороннего обеспечения, что важно для успешной работы в динамичной среде, каковой является отрасль научных исследований и конструкторско-технологических разработок.

7. в данном учебном пособии нашли отражение структура НИОКР и их особенности, описание процессов планирования и управления, а также вопросы их обеспечения.

## **1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ. ОРГАНИЗАЦИЯ И ВЫПОЛНЕНИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ**

Законодательных нормативных актах Российской Федерации понятие НИОКР четко не сформулировано. Под научно-исследовательскими, опытно-конструкторскими и технологическими работами понимается совокупность работ, направленных на получение новых знаний и их практическое применение при создании нового изделия или технологии.

Согласно ст. 769 части второй Гражданского кодекса Российской Федерации к научно-исследовательским работам (НИР) относятся обусловленные техническим заданием (ТЗ) заказчика научные исследования, а к опытно-конструкторским (ОКР) – разработка образца нового изделия. Для определения НИР и ОКР в английском языке используется термин «Research & Development» (R&D).

### **1.1 Основные понятия в области НИОКР**

### 1.1.1 Определения НИОКР в законодательстве Российской Федерации и нормативно-технической документации

Федеральным законом РФ от 23.08.1996 г. №127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» установлены следующие определения:

*Научная (научно-исследовательская) деятельность* – деятельность, направленная на получение и применение новых знаний, в том числе:

*фундаментальные научные исследования* – экспериментальная или теоретическая деятельность, направленная на получение новых знаний об основных закономерностях строения, функционирования и развития человека, общества, окружающей природной среды;

*прикладные научные исследования* – исследования, направленные преимущественно на применение новых знаний для достижения практических целей и решения конкретных задач.

*Экспериментальные разработки* – деятельность, которая основана на знаниях, приобретенных в результате проведения научных исследований или на основе практического опыта, и направлена на сохранение жизни и здоровья человека, создание новых материалов, продуктов, процессов, устройств, услуг, систем или методов и их дальнейшее совершенствование.

1. научно-исследовательским работам относятся работы, связанные с осуществлением научной (научно-исследовательской), научно-технической деятельности и экспериментальных разработок:

1.1. по которым получены результаты, подлежащие правовой охране, но не оформленные в установленном законодательством порядке;

1.2. по которым получены результаты, не подлежащие правовой охране в соответствии с нормами действующего законодательства.

*Научный и (или) научно-технический результат* – продукт научной и (или) научно-технической деятельности, содержащий новые знания или решения и зафиксированный на любом информационном носителе.

*Научная и (или) научно-техническая продукция* – научный и (или) научно-технический результат, в том числе результат интеллектуальной деятельности, предназначенный для реализации.

Налоговый Кодекс РФ (п.п. 16.1, п. 3, ст. 149) включает в состав НИОКР следующие виды деятельности:

– разработка конструкции инженерного объекта или технической системы;

– разработка новых технологий, то есть способов объединения физических, химических, технологических и других процессов с трудовыми процессами в целостную систему, производящую новую продукцию (товары, работы, услуги);

– создание опытных, то есть не имеющих сертификата соответствия, образцов машин, оборудования, материалов, обладающих характерными для нововведений принципиальными особенностями и не предназначенных для реализации третьим лицам, их испытание в течение времени, необходимого для получения данных, накопления опыта и отражения их в технической документации.

Одновременно ст. 262 Налогового кодекса РФ разрешает учесть для целей налогообложения прибыли следующие расходы на НИОКР, давшие положительный результат:

– на создание новой или по усовершенствованию производимой продукции, товаров, работ или услуг;

– на создание новых или по усовершенствованию применяемых технологий, на создание новых видов сырья или материалов;

– на изобретательство по созданию новой или усовершенствованию производимой продукции, товаров, работ или услуг.

Документ ПБУ 17/02 от 19 ноября 2002 г. «Учет расходов на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы» относит к НИОКР только работы, связанные с осуществлением научной (научно-исследовательской), научно-технической деятельности и экспериментальных разработок.

Документ Р 50-605-80-93 «Рекомендации по стандартизации. Система разработки и постановки продукции на производство. Термины и определения» содержит следующие определения:

*Научно-исследовательская работа по созданию продукции* – комплекс теоретических и (или) экспериментальных исследований, проводимых с целью получения обоснованных исходных данных, изыскания принципов и путей создания (модернизации) продукции. Научно-исследовательская работа по созданию продукции является одной из разновидностей прикладных научно-исследовательских работ. Она служит начальным этапом комплекса работ по созданию и освоению новой техники и проводится в случае, когда разработку продукции невозможно или нецелесообразно осуществить без проведения соответствующих научных исследований. В отличие от фундаментальных и поисковых НИР, прикладная НИР проводится с целью создания конкретного образца (типа изделия, материала) или исследования особенностей его функционирования, или применения. Одним из этапов НИР по созданию материала

является опытно-технологическая работа, в процессе которой изготавливается опытная партия материала.

*Опытно-конструкторская работа (ОКР)* – комплекс работ по разработке конструкторской и технологической документации на опытный образец, изготовлению и испытаниям опытного (головного) образца (опытной партии), выполняемых для создания (модернизации) продукции. Определение относится к разработке как серийной, так и несерийной или единичной продукции.

*Опытно-технологическая работа (ОТР)* – комплекс работ по созданию новых веществ, материалов и (или) технологических процессов и технической документации на них.

Опытно-конструкторская и опытно-технологическая работы, как правило, начинаются с технического задания. При проведении ОКР в ее состав могут быть включены работы по созданию технологической документации и средств технологического оснащения для изготовления опытных образцов, установочных серий или головных образцов, а также несерийной или единичной продукции.

### **1.1.2 Законодательное регулирование взаимоотношений в научной и научно-технической деятельности. Техническое регулирование и стандартизация в области выполнения НИОКР**

Отношения между субъектами научной и (или) научно-технической деятельности, органами государственной власти и потребителями научной (или) научно-технической продукции (работ и услуг) регулируются Гражданским кодексом РФ.

Правовые основы НИОКР раскрыты в главе 38 Гражданского кодекса (ГК) РФ. Как определяет п. 1 ст. 769 ГК РФ, по договору на выполнение научно-исследовательских работ исполнитель обязуется провести научные исследования, обусловленные ТЗ заказчика. Договор на выполнение опытно-конструкторских и технологических работ предусматривает разработку образца нового изделия, конструкторской документации на него или новой технологии. Условия договора на выполнение НИОКР должны соответствовать законам и иным правовым актам об исключительных правах (интеллектуальной собственности) (п. 4 ст. 769 ГК РФ).

Договоры на выполнение НИОКР могут охватывать как весь цикл работ, включающий проведение исследований для выявления возможности получения новых материалов, устройств, технологий, разработку и изготовление опытных образцов в целях доведения их до стадии промышленного применения, так и отдельные этапы этих работ. Для указанных договоров характерно наличие технического задания (п. 1 ст. 769 и ст. 773 ГК РФ и установление пределов и условий использования сторонами полученных результатов работ (п. 1 ст. 772 ГК РФ).

Одним из основных признаков договора на выполнение НИОКР является новизна получаемых результатов и возможность создания новых объектов интеллектуальной собственности (изобретений, полезных моделей и промышленных образцов). Другая отличительная особенность этих работ – их творческий характер.

Выполнение НИОКР в гражданской и военной сфере регламентировано стандартами.

Согласно стандарту ISO 8402 под стандартизацией понимается деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления положений для всеобщего и многократного использования в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Федеральный закон РФ от 10 июня 1993 г. №5154-1 «О стандартизации» предусматривает установление норм, требующих государственного регулирования на территории России единого механизма реализации государственной политики в области стандартизации.

Стандартизация как деятельность по установлению норм, правил и характеристик осуществляется в целях обеспечения:

- безопасности продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;

- технической и информационной совместимости и взаимозаменяемости продукции;

- качества продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии;

- единства измерений;

- экономии всех видов ресурсов;

- безопасности хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций;

- оборонеспособности и мобилизационной готовности страны. Основным документом, регламентирующим перечисленные

- вопросы, является стандарт.

Стандарты могут быть следующих видов:

- международный стандарт (МС);

- европейский стандарт (EN);

- государственный стандарт стран СНГ (ГОСТ);

- государственный стандарт России (ГОСТ Р);

- региональный стандарт (например, РСТ);

- отраслевой стандарт (ОСТ);

стандарт организации, предприятия, фирмы, корпорации, союза и т.п. (СТП).

Приоритетным направлением при разработке стандартов в современных условиях является их гармонизация с международными стандартами серии ИСО. В этом случае при утверждении стандарта ему присваивается обозначение ГОСТ ИСО или ГОСТ Р ИСО, и номером стандарта становится номер аналогичного документа МС ИСО.

Технический регламент – в Российской Федерации документ (нормативный правовой акт), устанавливающий обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции, в том числе зданиям, строениям и сооружениям, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации).

Понятие технического регламента введено Федеральным законом РФ от 27 декабря 2002 г. №184-ФЗ «О техническом регулировании». Закон разделил понятия технического регламента и стандарта, установив добровольный принцип применения стандартов. Технические регламенты,

отличие от них, носят обязательный характер, однако могут устанавливать только минимально необходимые требования в области безопасности, причем приниматься они могут только в определенных целях, а именно:

защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;

охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;

предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей;

обеспечения энергетической эффективности. На переходный период, до принятия необходимых технических регламентов, с указанными целями должны применяться соответствующие требования ранее принятых ГОСТ (ГОСТ Р).

настоящее время действуют следующие межотраслевые системы стандартов, которыми производители руководствуются на стадии НИОКР планируемых к производству изделий:

– Государственная система стандартизации (ГСС)  
(ГОСТ Р серии 1);

Единая система конструкторской документации (ЕСКД) (ГОСТ серии 2);

Единая система технологической документации (ЕСТД) (ГОСТ серии 3);

Система показателей качества продукции (ГОСТ серии 4);

Система стандартов по информации библиотечному и издательскому делу (ГОСТ серии 7);

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) (ГОСТ серии 8);

Государственная система стандартов безопасности труда (ГССБТ) (ГОСТ серии 12);

Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП) (ГОСТ серии 14);

Система разработки и постановки продукции на производство (СППП) (ГОСТ серии 15);

Система стандартов в области охраны природы (ГОСТ серии 17);

Единая система программной документации (ЕСПД) (ГОСТ серии 19);

Комплексная система общих технических требований (КСОТТ) (ГОСТ серии 20);

Система технической документации на автоматизированные системы управления (ГОСТ серии 24);

Государственная система «Надежность в технике» (ГОСТ серии 27);

Система технического обслуживания и ремонта техники (ГОСТ серии 28);

Система стандартизации в области эргономики и технической эстетики (ГОСТ серии 29, ГОСТ серии 50);

Комплекс стандартов на автоматизированные системы (КСАС, ГОСТ серии 34);

– Система стандартизации вычислительной техники (ГОСТ серии 54);

Системы качества (ГОСТ серии 40) и др. Для нормативных документов на оборонную продукцию используются следующие наименования:

ГОСТ В – Межгосударственные военные стандарты;

ГОСТ ВД ... – Военные дополнения к межгосударственным стандартам;

ГОСТ ... ВД – Дополнения к межгосударственным стандартам на период военного положения;

ГОСТ В ... ВД – Дополнения к межгосударственным военным стандартам на период военного положения;

ГОСТ\* – Межгосударственные стандарты с едиными требованиями для народного хозяйства и обороны страны;

РД В – Межгосударственные военные рекомендации;

ГОСТ РВ – Государственные (национальные) военные стандарты;

ГОСТ Р ВД ... – Военные дополнения к национальным стандартам;

ГОСТ Р ... ВД – Дополнения к национальным стандартам на период военного положения;



ГОСТ РВ ... ВД – Дополнения к государственным (национальным) военным стандартам на период военного положения;

Р РД В – Национальные военные рекомендации;

ОСТ... ВД, ОСТ В... ВД – Дополнения к стандартам на особый период.

Из наименования документов видно, что цели, задачи и проблемы военной и гражданской стандартизации во многом едины. Ярким примером этого являются общетехнические стандарты Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и Единой системы технологической документации (ЕСТД).

Изначальная цель создания этих стандартов как раз и заключалась в том, чтобы иметь единые требования ЕСКД и ЕСТД для изделий гражданского и военного назначения. Эти стандарты устанавливают единые требования, правила и нормы для разработки конструкторской и технологической документации на изделия гражданского и военного назначения, выполняемые в бумажной и электронной форме (спецификации, технические условия, чертежи, схемы, электронные модели и структуры, интерактивные электронные и мультимедийные руководства, формуляры, паспорта, маршрутные и операционные карты, системы классификации и обозначения и др.).

Следует отметить, что основная часть комплекса стандартов была разработана в 70-е и 80-е годы прошлого века. Частично эти стандарты морально устарели и в полной мере не отражают современных тенденций, связанных с изменением уровня развития техники, условий хозяйствования, новыми подходами в решении задач, повышением уровня гармонизации национальных стандартов с международными (в первую очередь в области технологий управления и информационных технологий). Как результат – стандарты теряют свою актуальность и требуют пересмотра.

Техническая документация НИОКР представляет собой перечень отчетных документов, разрабатываемых на каждом этапе ТЗ.

При этом, если перечнем технической документации в НИР можно считать выдаваемую научно-техническую продукцию, прописанную в пункте 4 ТЗ «Этапы НИР», то для определения необходимой номенклатуры технической документации по ОКР рекомендуется руководствоваться ГОСТ РВ 15.203 [42].

Во всех ТЗ установлено прописывать, что отчетную документацию о НИОКР необходимо оформлять в соответствии с требованиями нормативно – технических документов (ЕСКД, ЕСПД, ГОСТ 7.32 [25]) в зависимости от вида выполняемой работы.

Кроме того, для организации работ по НИОКР следует руководствоваться стандартами СРПП в части народнохозяйственной продукции и военной техники (ГОСТы серии 15). Это, в первую очередь, касается стандартов первой и второй группы СРПП.

Стандарты первой группы СРПП устанавливают:

требования к построению, содержанию, изложению, порядку согласования и принятия технического задания (ТЗ) на выполнение работ по изысканию научно-технических путей разработки образцов продукции, ТЗ на выполнение аванпроекта по технико-экономическому обоснованию возможности и целесообразности разработки особо сложной и массового применения продукции;

требования к выполнению исследований, аванпроекта, правила их выполнения и приемки, порядок разработки, согласования и принятия документов при организации и выполнении исследований, аванпроекта;

порядок реализации результатов законченных работ.

Стандарты второй группы СРПП устанавливают:

требования к построению, содержанию, изложению, порядку согласования и принятия ТЗ на выполнение ОКР по разработке (модернизации) изделий и опытно-технологических работ (ОТР) по разработке материалов;

требования к выполнению и приемке ОКР, ОТР, этапы ОКР, ОТР, правила их выполнения и приемки, порядок разработки, согласования и принятия документов при организации и выполнении ОКР, ОТР;

порядок реализации законченных работ;

требования к выполнению работ, обеспечивающих проведение ОКР, ОТР (программы и методики испытаний, испытания опытных образцов, сертификация типа продукции по опытному образцу и другие).

Для регламентации вопросов закрепления за государством прав на результаты научно-технической деятельности, условия и порядок передачи этих прав приняты следующие нормативные акты:

постановление Правительства Российской Федерации от 4 мая 2005 г. №284 «О государственном учете результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения»;

Федеральный закон РФ от 29 декабря 1994 г. №77-ФЗ «Об обязательном экземпляре документов»;

постановление Правительства Российской Федерации от 31 марта 2009 г. №279 «Об органе научно-технической информации федерального органа

исполнительной власти в сфере научной, научно-технической и инновационной деятельности».

последнее время в целях и задачах на проведение различных НИОКР все чаще встречается термин «автоматизация», под которым в общем случае понимается применение информационных технологий для автоматизации различных сфер деятельности. На современном российском рынке все заметнее становятся важные структурные изменения: предприятия переходят от автоматизации разрозненных участков конструкторско-технологической подготовки производства к созданию единого информационного пространства в рамках предприятия. Данная тенденция, хотя и с некоторым опозданием, начинает соответствовать общемировой практике. Простая автоматизация рабочих мест перестала устраивать, так как в условиях усиливающейся конкуренции руководству предприятия необходимо решать вопросы роста и оперативного изменения номенклатуры выпускаемых изделий, быстрого внесения изменений в изделия, качественного технического сопровождения изделий в ходе их жизненного цикла. Для эффективного управления большим количеством совместных работ и параллельно текущих процессов. Использование только лишь административных и организационных методов, в полной мере не решает задачу управления в таком виде деятельности, как НИОКР. Возникновение непредвиденных проблем технического характера, необходимость перераспределения ресурсов, появление новых рыночных возможностей требуют применения новых информационных технологий. Сокращение сроков подготовки производства на основе создания и внедрения эффективных автоматизированных систем и новых информационных технологий не только увеличивает прибыль предприятия за счет реализации дополнительной продукции, но и высвобождает дополнительные средства для разработки новых продуктов, тем самым повышая его общий доход.

### **1.1.3 Место НИОКР в жизненном цикле изделия (продукции)**

точки зрения стратегических аспектов управления НИОКР, под *жизненным циклом изделия* следует понимать время от начала оформления идеи изделия до окончания физического существования последнего экземпляра этого изделия.

Структура жизненного цикла изделия (продукции) в общем случае включает следующие этапы:

- маркетинговые исследования потребностей рынка;
- генерация идей и их фильтрация;
- техническая и экономическая экспертиза проекта;
- научно-исследовательские работы по тематике изделия (продукции);
- опытно-конструкторская работа и (или) опытно-технологическая работа;

пробный маркетинг;  
подготовка производства изделия на заводе-изготовителе серийной продукции;

собственно производство и сбыт;  
эксплуатация изделий;  
утилизация изделий.

Этапы 4–7 непосредственно предшествуют производству изделия и их можно рассматривать как комплекс научно-технической подготовки производства.

Жизненный цикл – это не временной период существования продукции данного типа (одного наименования и обозначения), а процесс последовательного изменения ее состояния, обусловленный видом производимых на нее воздействий. При этом продукция конкретного типа может одновременно находиться в нескольких стадиях жизненного цикла, например, в стадиях производства и эксплуатации. Основные параметры, характеризующие границы этапов жизненного цикла изделия, приведены в таблице 1.1.

Деятельность и работы на всех этапах жизненного цикла продукции регламентированы соответствующими стандартами СРПП, а также законодательными актами.

точки зрения СРПП, стадии разработки и производства являются определяющими. Поэтому началом жизненного цикла продукции условно считают формирование исходных требований к ней. В таблице 1.2 приведены стадии жизненного цикла продукции в соответствии с ГОСТ15.000 [32].

Таблица 1.1 – Границы этапов жизненного цикла изделия

Наименование этапа	Начало этапа	Окончание этапа
Маркетинговые исследования рынка	Заключение договора на проведение исследований	Сдача отчета по результатам исследований
Генерация идей и их фильтрация	Сбор и фиксирование предложений по проектам	Окончание отбора проектов-конкурентов
Техническая и экономическая экспертиза проектов	Комплектация групп оценки проектов	Сдача отчета по экспертизе проектов, выбор проекта-победителя
НИР	Утверждение ТЗ на	Утверждение акта об

	НИР	окончании НИР
ОКР	Утверждение ТЗ на ОКР	Наличие комплекта конструкторской документации, откорректированной по результатам испытаний опытного образца
Пробный маркетинг	Начало подготовки производства опытной партии	Анализ отчета о результатах пробного маркетинга
Подготовка производства на заводе-изготовителе	Принятие решения о серийном производстве и коммерческой реализации изделий	Начало установившегося серийного производства
Собственно производство и сбыт	Изготовление и продажа первого серийного образца изделия	Поставка потребителю последнего экземпляра изделия
Эксплуатация	Получение потребителем первого экземпляра изделия	Снятие с эксплуатации последнего экземпляра изделия
Утилизация	Момент списания первого экземпляра изделия с эксплуатации	Завершение работ по утилизации последнего изделия, снятого с эксплуатации

## 1.2 Формулировка признаков работ, соответствующих НИР, ОКР и ОТР

### 1.2.1 Формулировка признаков работ, соответствующих НИР

**Определение НИР.** Согласно ГОСТ 15.101 [33] под НИР понимается комплекс теоретических и (или) экспериментальных исследований, проводимых с целью получения обоснованных исходных данных, изыскания принципов и путей создания (модернизации) продукции.

**Виды НИР.** Следует рассматривать следующие разновидности научно-исследовательских работ: фундаментальные, поисковые, прикладные.

Укрупненные характеристики видов НИР приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Укрупненные характеристики видов НИР

Виды исследований	Результаты исследований
Фундаментальные	Расширение теоретических знаний. Получение новых научных данных о процессах, явлениях, закономерностях, существующих в исследуемой области; научные основы, методы и принципы исследований
Поисковые	Увеличен объем знаний для более глубокого понимания изучаемого предмета. Разработка прогнозов развития науки и техники; открытие путей применения новых явлений и закономерностей
Прикладные	Разрешены конкретных научных проблем для создания новых изделий. Получение рекомендаций, инструкций, расчетно-технических материалов, методик и т.д.

**Цели и задачи НИР. Фундаментальные НИР** нацелены на получение новых знаний или пониманий фундаментальных аспектов, заслуживающих внимания фактов и явлений без специальных применений предстоящим процессам.

**поисковым НИР** относятся работы, проводимые с целью: увеличения объема знаний для более глубокого понимания изучаемого предмета; разработки прогнозов развития науки и техники; изучения путей применения новых явлений и закономерностей и т.п.

Задачами поисковых НИР являются:

- обоснование перспективных направлений развития техники, технологий, экономики, производства и т.д. (в том числе по результатам фундаментальных НИР);

- определение технических, экономических, экологических и других требований к объектам (изделиям), являющимся предметом исследований:

- выбор и обоснование направлений ОКР и ОТР, обеспечивающих создание новых объектов, входящих в них комплектующих изделий, разработку соответствующих технологических процессов, оборудования и т.п.;

- выбор и обоснование направлений прикладных НИР;

исследование возможности и целесообразности использования частных технических решений для создания объектов (изделий) и их элементов с заданными характеристиками или параметрами.

**прикладным НИР** относятся работы, проводимые с целью разрешения конкретных научных проблем для создания новых изделий и технологий; получения рекомендаций, инструкций, методик; определения возможности проведения ОКР по тематике НИР и т.п.

Задачами прикладных НИР являются:

создание научно-методических и нормативных документов (методик, стандартов, алгоритмов, программ и т.п.) для исследуемых объектов;

изготовление моделей, макетов, стендов, экспериментальных образцов новых объектов (изделий), оборудования и т.д.;

разработка ТЗ на изготовление новых объектов (изделий), в том числе комплектующих изделий;

разработка ТЗ на изготовление нового технологического и испытательного оборудования для объектов, в том числе комплектующих изделий.

Научно-исследовательская работа по созданию продукции является одной из разновидностей прикладных НИР. Она служит начальным этапом комплекса работ по созданию и освоению производства новой продукции

проводится в случае, когда разработку продукции невозможно или нецелесообразно осуществить без проведения соответствующих научных исследований.

**Виды работ, проводимых в рамках НИР.** Основными видами работ,

характеризующими НИР и позволяющими отнести их к признакам НИР, являются:

обзор научно-технических достижений в исследуемой области;

патентные исследования;

теоретические исследования;

моделирование и макетирование;

экспериментальные исследования.

**Результаты НИР.** Результатами НИР, а иными словами – научно-технической продукцией (НТП), полученной в результате выполнения НИР, могут стать:

для поисковых НИР:

основополагающие (концептуальные) документы, связанные с вопросами развития того или иного научно-технического направления;

программные, плановые, методические документы (программы, концепции основных направлений и планов научно-технического развития, федеральных целевых программ, проектов и др. документов);

обоснование необходимости выполнения ОКР или ОТР для продолжения исследований или реализации результатов проведенных исследований;

ТЗ на ОКР или другие НИР;

для прикладных НИР:

нормативные, технические, организационно-методические, информационно-справочные и учебные документы (положения, стандарты, методики, инструкции, наставления, руководства, пособия, справочники, учебники), используемые учреждениями, организациями и предприятиями при обучении персонала, разработке, производстве, эксплуатации, хранении, ремонте и утилизации различных видов продукции;

макеты, модели, экспериментальные образцы, стенды, научно-методическая документация, нормативно-техническая документация, программная и другая документация, предусмотренная государственным контрактом;

проекты ТЗ на разработку продукции (изделий, технологических процессов и т.п.).

### **1.2.2 Формулировка признаков работ, соответствующих ОКР**

**Определение ОКР.** ОКР – комплекс работ по разработке конструкторской и технологической документации на опытный образец продукции, изготовлению и испытаниям опытного образца (опытной партии) продукции, выполняемых при создании (модернизации) нового вида продукции по техническому заданию.

**Цели ОКР.** Целью проведения опытно-конструкторской работы является разработка комплекта рабочей конструкторской документации в объеме и по качеству отработки, достаточного для постановки на производство определенного вида продукции.

Таким образом, опытно-конструкторская работа по своим целям является последовательной реализацией результатов ранее проведенных НИР.

**Виды работ, проводимых в рамках ОКР.** Основные виды работ, характеризующие ОКР, и позволяющие отнести их к признакам ОКР, являются:

– эскизное проектирование (разработка принципиальных технических решений изделия, дающих общее представление о принципе работы и (или) устройстве изделия);

техническое проектирование (разработка окончательных технических решений, дающих полное представление о конструкции изделия);

конструирование (конструкторская реализация технических решений);



моделирование, опытное изготовление образцов продукции;  
подтверждение технических решений и их конструкторской реализации путем проведения испытаний макетов и опытных образцов.

Таким образом, видны характерные отличия от видов работ, проводимых в рамках НИР.

**Результаты ОКР.** Результатом проведения ОКР является получение комплекта рабочей конструкторской документации (РКД) для постановки на производство нового вида продукции.

**Рабочая конструкторская документация** – совокупность конструкторских документов, предназначенных для изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации и ремонта изделия. Наряду с термином «рабочая конструкторская документация» используются с аналогичным определением термины «рабочая технологическая документация» и «рабочая техническая документация». Рабочая документация в зависимости от сферы использования подразделяется на производственную, эксплуатационную и ремонтную.

Таким образом, результатом ОКР, а иными словами, научно-технической продукцией (НТП) по ОКР и отличительным признаком в этой связи является комплект РКД. Такой комплект РКД в своем составе может содержать:

- собственно конструкторскую документацию;
- программную документацию;
- эксплуатационную документацию.

- отдельных случаях, если это предусмотрено требованиями технического задания, в состав рабочей конструкторской документации может быть включена ремонтная и технологическая документация.

Различные этапы ОКР по мере их выполнения должны содержать свои характерные результаты, не являющиеся НТП по ОКР, но характеризующие степень достижения основной цели ОКР, и, безусловно, являющиеся отличительными признаками ОКР. Такими результатами работ являются: техническая документация по результатам эскизного и технического проектирования;

- макеты, экспериментальные и опытные образцы, изготовленные в ходе выполнения ОКР;
- результаты испытаний опытных образцов (предварительных (ПИ), межведомственных (МВИ), приемочных и государственных) и др.).

### **1.2.3 Формулировка признаков работ, соответствующих ОТР**

**Определение ОТР.** Опытнo-технологическая работа (ОТР) – это комплекс работ по созданию технологии производства (изготовления) новых веществ, материалов и (или) технологических процессов и технической документации на них.

**Цели ОТР.** Целью проведения ОТР аналогично ОКР является разработка комплекта технической (рабочей конструкторской и технологической ) документации, в объеме и по качеству отработки достаточной для организации технологического процесса по изготовлению того или иного вещества, материала. В отличие от ОКР документация, разрабатываемая в рамках ОТР, касается специального оборудования, обеспечивающего условия для обеспечения производства вещества (материалов), технологического процесса.

Следует различать опытнo-технологическую работу и этап разработки технологического процесса и технологической документации при постановке на производство вновь разработанных образцов продукции. Такие работы проводятся в рамках реализации законченной ОКР технологической подготовки и освоения производства, и не относятся

- ОТР. В то же время, в случае особой сложности технологического процесса, наличия множества специальных требований к нему, а также большого объема работ такая подготовка может быть выделена в самостоятельную ОТР.

Таким образом, опытнo-технологическая работа, аналогично ОКР, имеет совершенно прикладную цель и по своим целям является последовательной реализацией результатов ранее проведенных НИР.

**Виды работ, проводимых в рамках ОТР.** Виды работ,

характеризующие ОТР и позволяющие отнести их к признакам ОТР, в основном аналогичны ОКР. Отличительной особенностью их является прикладное назначение, то есть разработка не образца продукции, а технологии (производства вещества, материала, организации технологического процесса). С учетом этих особенностей к ним относятся:

- предварительное проектирование (разработка принципиальных технических решений по созданию условий, технического оснащения, способов и методов обработки исходных субстанций и т.п.);

– разработка рабочей технологической документации (конструкторская реализация технических решений по оснащению, обеспечению условий, выполнению технических требований для разрабатываемого технологического процесса);

- опытнoе изготовление образцов продукции (опытных партий продукции);

- подтверждение технических решений и их технологической и конструкторской реализации путем проведения испытаний опытных образцов продукции, изготовленных по разрабатываемой технологии.

Таким образом, из этих особенностей видны признаки, характеризующие ОТР, а также отличительные особенности ОТР в сравнении с ОКР.

**Результаты ОТР.** Результатом проведения ОТР является получение комплекта технологической документации (ТД) для организации процесса получения (производства) веществ, материалов и (или) технологического процесса. Таким образом, результатом ОТР, а иными словами НТП по ОТР

- отличительным признаком в этой связи, является такой комплект документации.

Комплект документации по результатам ОТР в своем составе может содержать:

- конструкторскую документацию, в том числе и эксплуатационную, на производственное и специальное оборудование, стенды, оснастку, позволяющие создавать необходимые условия и выполнять технические требования для соответствующего технологического процесса;

- программную документацию на программные средства, осуществляющие управление и мониторинг технологического процесса;

- технологическую документацию на subprocessы и (или) типовые технологические процессы.

Различные этапы ОТР по мере их выполнения должны содержать свои характерные результаты, не являющиеся НТП по ОТР, но характеризующие степень достижения основной цели ОТР, и, безусловно, являющиеся отличительными признаками ОКР.

Такими результатами работ являются:

- техническая документация по результатам эскизного и технического проектирования;

- макеты, экспериментальные образцы, опытные образцы (опытные партии) продукции, изготовленные по разрабатываемому в ходе выполнения ОТР технологическому процессу;

- результаты испытаний опытных образцов (опытных партий) продукции, изготовленных по разрабатываемому технологическому процессу.

### **1.3 Этапы НИОКР и их характеристики**

#### **1.3.1 Этапы НИР**

Этап НИР – часть работ, проводимых в рамках НИР, характеризующаяся определенным полученным результатом, являющаяся объектом планирования и

финансирования. Согласно ГОСТ 15.101 [33] в общем случае предусмотрены следующие этапы НИР:

- этап выбора направления исследований;
- этап теоретических исследований;
- этап экспериментальных исследований;
- этап обобщения и оценки результатов исследований.

Этап «Выбор направления исследований». Этап «Выбор направления исследований» проводят с целью определения оптимального варианта направления исследований на основе анализа состояния исследуемой проблемы, в том числе результатов патентных исследований, и сравнительной оценки вариантов возможных решений с учетом результатов прогнозных исследований, проводившихся по аналогичным проблемам.

Этап «Теоретические исследования». Этап «Теоретические исследования» проводят с целью получения достаточных теоретических результатов исследований для решения поставленных перед НИР задач. При проведении теоретических исследований должен быть обоснован выбор (подход к разработке) моделей, методов, программ и (или) алгоритмов, позволяющих увеличить объем знаний для более глубокого понимания и путей применения новых явлений, механизмов или закономерностей.

Этап «Экспериментальные исследования». Этап «Экспериментальные исследования» проводят с целью получения достоверных экспериментальных результатов исследований для решения поставленных перед НИР задач. Иными словами, целью экспериментальных исследований является выявление свойств исследуемых объектов, проверка справедливости теоретических исследований и на этой основе широкое и глубокое изучение темы научного исследования. Проводится систематизация и предварительная оценка полученных результатов и др.

Этап «Обобщение и оценка результатов исследований». Этап «Обобщение и оценка результатов исследований» проводят с целью подведения итогов и обобщения результатов научно-технических исследований, выпуска обобщенной отчетной научно-технической документации по НИР, оценки эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем (в том числе оценки создания конкурентоспособной продукции).

### **1.3.2 Этапы ОКР**

Аналогично НИР этапом ОКР называют совокупность работ, характеризующуюся признаками их самостоятельного целевого планирования и финансирования, направленную на получение определенных конечных результатов по разработке,

проверке и подтверждению соответствия характеристик продукции установленным требованиям.

Требованиями ГОСТ Р 15.201 [35], ГОСТ РВ 15.203 [42] и ГОСТ 2.103 [4] установлены следующие этапы ОКР:

- этап технического предложения;
- этап эскизного проектирования;
- этап технического проектирования;
- этап разработки рабочей конструкторской документации;
- этап изготовления опытного образца и проведения предварительных испытаний;
- этап проведения приемочных (межведомственных, государственных) испытаний.

Этап «Техническое предложение». В соответствии с ГОСТ 2.118 [8] этап «Техническое предложение» проводится с целью выявления дополнительных или уточненных требований к продукции (технических характеристик, показателей качества и др.), которые не могли быть указаны в техническом задании, и если это целесообразно сделать на основе предварительной конструкторской проработки и анализа различных вариантов изделия. Техническое предложение может содержать один или несколько вариантов решения задач, поставленных в ТЗ, сопровождаться общими схемами и рисунками. Кроме этого, на этапе технического предложения может разрабатываться предварительное технико-экономическое обоснование (ТЭО) проведения ОКР и реализации результатов.

Этап «Эскизный проект». Согласно ГОСТ 2.119 [9] этап «Эскизный проект» выполняется с целью установления принципиальных (конструктивных, схемных, технологических и др.) решений по новому виду продукции, дающих общее представление о принципе работы и (или) устройстве продукции и его составных частей, выполнении заданных в ТЗ требований к их эксплуатационным характеристикам, а также о возможности изготовления в промышленных условиях. Перечень работ на этапе «Эскизный проект» также установлен указанным ГОСТ.

Этап «Технический проект». В соответствии с ГОСТ 2.120 [10] этап «Технический проект» проводится с целью выявления окончательных

технических решений по разрабатываемому изделию (продукции), дающих полное представление о конструкции изделия и принципиальных технологических решениях по его изготовлению в промышленных условиях. При необходимости этап «Технический проект» при выполнении ОКР может предусматривать разработку

нескольких вариантов разработки изделия. В этом случае оптимальный вариант выбирают исполнитель ОКР и заказчик по результатам приемки технического проекта. Перечень работ на этапе «Технический проект» также установлен указанным ГОСТ.

Этап «Разработка конструкторской документации». Цель и содержание работ этапа заключаются в разработке РКД для изготовления и проведения испытаний опытного образца разрабатываемого изделия, в том числе, если это предусмотрено требованиями ТЗ, учебно-тренировочных средств, специального технологического оборудования и оснастки, предназначенных для обеспечения эксплуатации, технического обслуживания и ремонта образца разрабатываемой продукции в процессе эксплуатации, а также программной документации.

Задачи этапа вытекают из целей этапа:

- разработка рабочей конструкторской документации для изготовления опытного образца продукции в соответствии с перечнем РКД, разработанным на этапе технического проектирования;
- технологическая и метрологическая экспертиза разработанной РКД;
- проверка реализации в РКД требований по обеспечению необходимого уровня унификации и стандартизации изделия (продукции)
- его составных частей;
- разработка и согласование программы и методик предварительных испытаний опытного образца продукции.

Этап «Изготовление опытного образца и проведение предварительных испытаний». Целью проведения этапа «Изготовление опытного образца и проведение предварительных испытаний» является предварительная оценка соответствия разработанных технических решений и их конструкторской реализации требованиям ТЗ.

Такая оценка осуществляется посредством изготовления опытного образца продукции по разработанной конструкторской документации с последующими испытаниями изготовленного образца продукции по программе предварительных испытаний.

Задачи этапа, из которых следует содержание работ по этапу:

- подготовка опытного производства для изготовления опытного образца продукции;
- разработка комплекта эксплуатационной документации (ЭД) на основе перечня, уточняемого на этапе разработки РКД;

- изготовление опытного образца разрабатываемой продукции по разработанной РКД, его отработка (доводка, настройка) в целях подготовки к предварительным испытаниям;
- проведение предварительных испытаний опытного образца продукции, проверка и оценка ЭД на продукцию в ходе ПИ;
- корректировка РКД и ЭД и доработка опытного образца продукции по результатам изготовления и предварительных испытаний с присвоением РКД литеры «О»;
- разработка программы и методик приемочных (государственных) испытаний.

Этап «Проведение приемочных (государственных испытаний)». Целями этапа проведения приемочных испытаний опытного образца продукции являются:

- оценка технических возможностей создаваемой продукции, проверка и подтверждение соответствия технических и эксплуатационных характеристик опытного образца разрабатываемой продукции требованиям ТЗ;
- выдача рекомендаций о целесообразности промышленного (серийного) производства и о готовности разработанной документации к развертыванию промышленного (серийного) производства;
- оценка эксплуатационной документации и выдача заключения о допуске ЭД к эксплуатации.

Задачи этапа, из которых следует содержание работ по этапу:

- организация проведения приемочных испытаний, подготовка к ним конструкторской документации и опытного образца, разрабатываемой продукции;
- проведение приемочных испытаний по утвержденной программе
- методикам;
- корректировка РКД и ЭД и доработка опытного образца продукции по результатам приемочных испытаний с присвоением РКД литеры «О1»\*.

### **1.3.3 Особенности разделения на этапы ОТР**

Аналогично ОКР этапом ОТР называют совокупность работ, характеризующихся признаками их самостоятельного целевого планирования и финансирования, направленных на получение конечных результатов по разработке, проверке и подтверждению соответствия разрабатываемой технологии требованиям ТЗ.

Характерным отличием целей этапов ОТР и задач, решаемых на различных этапах в ходе выполнения ОТР, является их направленность на разработку не образца продукции, а некой технологии (изготовления вещества, материала и т.п.) и (или) технологического процесса. Поэтому все работы по этапам имеют целевую направленность на разработку технической документации на специальное оборудование, обеспечивающее условия и соответствующие процессы для организации производства вещества (материалов) и (или) технологического процесса, и подтверждение соответствия разработанной технологии (технологического процесса) требованиям ТЗ.

Этап «Предварительный проект» проводится с целью установления принципиальных (конструктивных, схемных, технологических и др.) решений по разрабатываемому технологическому процессу, дающих общее представление об условиях, принципах организации различных составных частей и технологического процесса в целом, а также о возможности реализации разрабатываемого технологического процесса в различных производственных (промышленных) условиях.

Задачами этапа являются:

- обоснование и формулирование назначения и области применения разрабатываемого технологического процесса, основных технических и производственных условий, состава и назначения оборудования, сравнения с существующими аналогичными технологическими процессами;
- проведение ориентировочных расчетов:
- подтверждающих результативность, устойчивость, управляемость разрабатываемой технологии (технологического процесса) в заданных технологических условиях;
- подтверждающих количественные и качественные характеристики изготовленной по разрабатываемой технологии (процессу) продукции;
- экономических показателей (экономической эффективности от внедрения в народное хозяйство и др.).

Этап «Разработка рабочей технологической документации»

проводится с целью выявления окончательных технических решений по разрабатываемой технологии (технологическому процессу), дающих полное представление о принципах (физических, химических, технологических процессах), положенных в основу разрабатываемой технологии, состава и конструкции производственного и специального оборудования, оснастки, принципиальных организационно-технических решениях по реализации разрабатываемой технологии в



производственных (промышленных) условиях. На этапе должен быть разработан комплект ТД, позволяющей в условиях опытного производства реализовать разрабатываемую технологию (организовать технологический процесс) для изготовления опытных образцов (опытной партии) продукции (вещества, материала), которую планируется производить по разрабатываемой технологии.

Задачами этапа являются:

- выполнение работ, необходимых для обеспечения предъявляемых к разрабатываемой технологии требований и позволяющих получить полное представление о принципах, заложенных в основу разрабатываемой технологии, состава и конструкции оборудования, организационно-технических решениях по реализации разрабатываемой технологии в производственных условиях;

- оценка соответствия разрабатываемой технологии требованиям ТЗ;

- оценка технологичности, степени сложности реализации технологического процесса способов его реализации в различных производственных условиях, характеристика участия в разрабатываемом технологическом процессе производственного персонала;

- разработка перечня РКД для изготовления образцов производственного, стендового, испытательного оборудования, оснастки, программной документации для программного обеспечения,

обеспечивающих реализацию разрабатываемой технологии (технологического процесса), а также, при необходимости, технологической документации. При этом ТД, как правило, разрабатывается в объеме, необходимом для постановки технологического процесса в стандартных (типовых) производственных условиях, либо в объеме, установленном требованиями ТЗ, когда речь идет о постановке технологического процесса в специально установленных условиях.

- разработка РКД для изготовления образцов производственного, стендового, испытательного оборудования, оснастки, программной документации для программного обеспечения, обеспечивающих реализацию разрабатываемой технологии (технологического процесса), а также, при необходимости, технологической документации;

- технологическая и метрологическая экспертиза разработанной ТД;

- проверка реализации в ТД требований по обеспечению необходимого уровня унификации и стандартизации;

- разработка и согласование программы и методик предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) продукции, изготовленной по разрабатываемой технологии (технологическому процессу).

Этап «Изготовление опытного образца (опытной партии) и проведение предварительных испытаний» проводится с целью предварительной оценки соответствия разработанной технологии требованиям ТЗ посредством изготовления опытного образца (опытной партии) продукции по разрабатываемой технологии (технологическому процессу) и проведение на нем предварительных испытаний. задачами этапа являются:

- проведение организационно-технических мероприятий по реализации на опытном производстве разработанной технологии (организации разработанного технологического процесса) для изготовления опытного образца (опытной партии) продукции;

- доработка комплекта технической документации (конструкторской, программной, технологической) по результатам организации технологического процесса;

- изготовление опытного образца (опытной партии) продукции по реализованной технологии (организованному технологическому процессу);

- проведение предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) продукции, изготовленной по реализованной технологии (организованному технологическому процессу), проверка соответствия опытного образца (партии) продукции требованиям технических условий (ТУ) и оценка соответствия разработанной технологии (процесса) требованиям ТЗ;

- корректировка ТД по результатам изготовления опытного образца (партии) продукции и предварительных испытаний;

- разработка программы и методик приемочных (государственных) испытаний.

Этап «Проведение приемочных (государственных испытаний)». Целями этапа проведения приемочных испытаний разработанной технологии являются:

- оценка технических возможностей созданной технологии (технологического процесса), проверка и подтверждение соответствия ее технических характеристик требованиям ТЗ;

- выдача рекомендаций о целесообразности применения разработанной технологии (технологического процесса) в промышленном (серийном) производстве соответствующего вида продукции и о готовности разработанной технической документации к развертыванию промышленного (серийного) производства на основе созданной технологии.

Задачи этапа:

- изготовление опытного образца (опытной партии) продукции по реализованной технологии (организованному технологическому процессу) для приемочных испытаний
- проведение приемочных испытаний опытного образца (партии) по утвержденной программе и методикам;
- корректировка технической документации по результатам приемочных испытаний.

#### **1.4 Общие требования к организации и выполнению НИР**

Общие требования к организации и выполнению НИР, порядок выполнения и приемки НИР, этапы выполнения НИР, правила их выполнения и приемки, порядок разработки, согласования и утверждения документов в процессе организации и выполнения НИР и порядок реализации результатов НИР устанавливаются ГОСТ 15.101 [33] и ГОСТ РВ 15.105 [39].

Основанием для выполнения НИР служит техническое задание на НИР и (или) контракт (договор) с заказчиком (в случае наличия– заказчика), при этом ТЗ является составной частью контракта (договора). ТЗ является исходным техническим документом для проведения НИР, устанавливающим требования к содержанию, объемам и срокам выполнения этих работ. Утверждает ТЗ заказчик (в случаях договорных НИР) или руководитель предприятия–исполнителя (в случаях инициативных НИР). В ТЗ устанавливаются конкретные этапы для выполнения НИР, указываются сроки их выполнения, исполнители и конечный результат.

- процессе выполнения НИР должно быть обеспечено соблюдение требований ТЗ, в том числе разработаны и реализованы требования:
  - по обеспечению безопасности для жизни и здоровья людей и охраны окружающей среды, совместимости и взаимозаменяемости;
  - по стандартизации, унификации метрологическому обеспечению;

– по ограничению номенклатуры применяемых материалов и комплектующих изделий;

– по экономическому и рациональному использованию топливно-энергетических и материальных ресурсов при создании и эксплуатации создаваемой продукции;

– по обеспечению конкурентоспособности продукции, намечаемой к созданию.

Для решения отдельных самостоятельных вопросов НИР могут быть выделены составные части НИР, выполняемые соисполнителями (сторонними организациями) по контракту с головным исполнителем НИР.

- этих случаях головной исполнитель НИР выполняет функции заказчика по отношению к исполнителям составных частей НИР, координирует их работу и несет ответственность за качество и научно-технический уровень НИР в целом.

Процесс выполнения НИР в общем случае состоит из следующих этапов:

– выбор направления исследований; проводят с целью определения оптимального варианта направления исследований на основе анализа состояния исследуемой проблемы, в том числе результатов патентных исследований, и сравнительной оценки вариантов возможных решений с учетом результатов прогнозных исследований, проводившихся по аналогичным проблемам;

- теоретические и экспериментальные исследования; проводят с целью получения достаточных теоретических и достоверных экспериментальных результатов исследований для решения, поставленных перед НИР задач;

- обобщение и оценка результатов исследований, выпуск отчетной научно-технической документации по НИР; проводят с целью оценки эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем (в том числе оценки создания конкурентоспособной продукции и услуг);

- предъявления работы к приемке и ее приемка.

Этапы конкретной НИР, а также необходимость их приемки должны быть определены в ТЗ и контракте на ее выполнение. Этапы допускается разделять на самостоятельные отчетные подэтапы, что также должно быть оговорено в ТЗ и контракте.

Для экспериментальной проверки возможности создания образца продукции и определения его технических характеристик, проверки правильности результатов теоретических исследований и выбора оптимальных технических и конструкторско-технологических решений, в процессе выполнения НИР при необходимости создают макеты, модели, экспериментальные образцы. Необходимость разработки, изготовления и испытаний макетов устанавливают в ТЗ на НИР и контракте на ее выполнение.

Для обеспечения своевременного выполнения НИР и ее этапов, осуществления оперативного контроля за выполнением работ и составлением отчетной научно-технической документации (ОНТД) исполнитель НИР при необходимости разрабатывает, согласовывает с заказчиком и утверждает план совместных работ на выполнение НИР (план-график, сетевой план-график или другой планирующий документ), содержащий последовательность и сроки выполнения этапов НИР, состав исполнителей, номенклатуру и сроки составления ОНТД по этапам НИР и НИР в целом, сроки приемки этапов и НИР в целом.

На каждую НИР, как правило, также разрабатываются:

- частные ТЗ на НИР соисполнителям;
- план-проспект разработки отчета о НИР.

Согласованный и утвержденный план совместных работ на выполнение НИР является обязательным для всех участников НИР. В процессе выполнения работ исполнитель НИР по согласованию с заказчиком может уточнять и корректировать план совместных работ в пределах условий ТЗ и контракта на выполнение НИР.

ТЗ на НИР разрабатывается заказчиком (созаказчиками) совместно с головным исполнителем и утверждается до начала работ. План совместных работ на выполнение НИР (рабочая программа выполнения НИР) разрабатывается головным исполнителем под руководством научного руководителя на основании ТЗ и договора на НИР и утверждается заказчиком. Головной исполнитель оказывает исполнителям научную и методическую помощь, организует и координирует их работу, обмен научной информацией, утверждает заключения (акты приемки) на отчетные материалы исполнителей и составляет итоговый отчет о работе в целом.

Частные ТЗ организациям-соисполнителям разрабатываются головным исполнителем НИР и согласовываются после утверждения ТЗ на НИР. Утвержденные головным исполнителем частные ТЗ высылаются всем организациям-соисполнителям.

План-проспект для подготовки этапного и итогового отчета о НИР разрабатывается под руководством научного руководителя головным исполнителем и утверждается заказчиком.

Разработке ТЗ по запланированной теме должно предшествовать определенное теоретическое осмысление членами творческих коллективов целей исследования, общее ознакомление их с разрабатываемой проблемой. Эта работа проводится в рамках подготовительного этапа - предварительной проработки темы НИР. В мировой и отечественной практике проведения научных исследований на подготовительный этап выделяется от 25% до 30% времени, отведенного на эту работу.

Суть предварительной проработки запланированной темы НИР заключается в том, что головной исполнитель совместно с заказчиком окончательно определяют: цели предстоящих исследований по теме, обоснованность их постановки и реальность достижения.

Цели и задачи исследования зависят в первую очередь от того, какими планируются исследования – фундаментальными, поисковыми или прикладными.

Головной исполнитель совместно с заказчиком конкретизируют содержание исследования. Уясняют, какие явления, вопросы, процессы, закономерности оно должно охватить. При этом происходит разграничение темы исследований от смежных тем, то есть устанавливаются рамки исследуемого объекта и структура исследований.

Головной исполнитель совместно с заказчиком определяют этапы НИР, объем предстоящих работ, их сроки, форму выходных документов. Прогнозируют главные результаты НИР и намечают способы и формы их реализации.

На конечные результаты исследований существенное влияние оказывает хорошо подготовленная информационная база для НИР. В процессе совместной работы головной исполнитель совместно с заказчиком выясняют наличие справочных материалов у исполнителей и заказчика. При этом уточняются возможность, пути и способы получения информационных материалов авторским коллективом. Составляется библиография по открытой литературе и закрытым источникам. В итоге предварительно оценивается достаточность информационных материалов для выполнения запланированной НИР.

По итогам предварительной проработки темы заказчик совместно с головным исполнителем разрабатывают ТЗ на НИР, которое является основным документом, регламентирующим исследование по запланированной теме. Порядок его разработки, основные положения, комплекс требований к содержанию, объему и срокам выполнения НИР достаточно полно изложены в ГОСТ РВ 0015-101 [36].

При выявлении в процессе НИР нецелесообразности продолжения работ исполнитель НИР представляет заказчику обоснованное заключение

- прекращении работ. Основанием для прекращения НИР является совместное решение исполнителя НИР и заказчика либо решение руководства исполнителя НИР (при отсутствии заказчика). Прекращение НИР по инициативе заказчика оформляют также совместным решением исполнителя НИР и заказчика.

#### **1.4.1 Техническое задание на НИР**

*Общие требования к разработке ТЗ на НИР.* Основанием для разработки ТЗ на проведение НИР является предложение (заявка) заказчика, а исходными данными – назначение предмета разработки и основные требования к нему.

## Порядок разработки ТЗ, основные положения, комплекс требований

• содержанию, объему и срокам выполнения НИР достаточно полно отражены в ГОСТ РВ 0015-101 [36].

Техническое задание разрабатывается на основе:

- потребности и целесообразности;
- научного прогнозирования;
- результатов выполнения проблемных исследований, других научно-исследовательских и экспериментальных работ;
- результатов патентных исследований;
- отечественных, международных и региональных стандартов;
- анализа новейших достижений и перспектив развития отечественной и зарубежной науки и техники;
- опыта предыдущих разработок и эксплуатации аналогичной продукции, исходя из условий наиболее эффективного ее применения.

При разработке технического задания необходимо использовать методы научного прогнозирования и анализа передовых достижений отечественной и зарубежной науки и техники, результаты патентных исследований, учитывать требования заказчика. При разработке ТЗ выполняется технико-экономическое обоснование работы, приводятся ожидаемые результаты, отмечаются преимущества новой техники перед существующими отечественными и зарубежными аналогами, рассчитывается ориентировочная экономическая эффективность работы. Разрабатываемая новая техника должна соответствовать по своим технико - экономическим параметрам мировому уровню на период ее производства.

На основе полученной информации составляется аналитический обзор, и выдвигаются гипотезы. Выбираются направления работы и пути реализации требований, которым должно удовлетворять изделие. Определяются необходимые исполнители.

- соответствии с требованиями стандартов ТЗ должно содержать цель работы, объект и предмет исследования, информационную базу, этапы НИР, трудозатраты, время для выполнения работы, сроки ее завершения, форму выходных документов, а также условия и формы реализации и внедрения результатов. В ТЗ предусматривают реализацию всех обязательных требований, распространяющихся на данную продукцию, указывают предусмотренную законодательством форму подтверждения обязательным требованиям, технико-экономические требования к продукции,

определяющие ее потребительские свойства и эффективность применения, перечень документов, требующих совместного рассмотрения, порядок сдачи и приемки результатов разработки. Конкретное содержание ТЗ определяют заказчик и разработчик, а при инициативной разработке - разработчик.

**Содержание ТЗ на НИР.** Техническое задание на НИР в общем случае должно содержать следующие разделы:

– наименование работы и шифр; – основание для проведения НИР; – цель и задачи разработки НИР;

– исполнитель НИР, соисполнители; – этапы НИР; – сроки выполнения;

– основные требования к выполнению НИР; – технические требования; – технико-экономические требования;

– требования к разрабатываемой документации; – порядок реализации результатов НИР;

– перечень ОНТД, предъявляемой по окончании работ; – порядок выполнения и приемки НИР (этапов НИР); – технико-экономическое обоснование НИР; – дополнительные сведения; – приложения.

- разделе «Наименование работы, шифр» приводят полное наименование научно-исследовательской работы, условное наименование или шифр НИР.

- разделе «Основание для выполнения НИР» указывают полное наименование документа, на основании которого должна выполняться данная работа, номер и дату его утверждения, а также организацию, утвердившую документ.

- разделе «Цель и задачи НИР» приводят общую характеристику и оценку состояния вопросов, решаемых НИР, излагают цель данной работы (исследование принципов и путей создания новых и улучшения существующих видов продукции, разработка научно-технических основ проведения исследований тактико-технических характеристик и параметров продукции, исследование вопросов использования и эксплуатации и др.), а также задачи, решение которых обеспечивает достижение поставленных целей. В разделе также приводят краткую характеристику и оценку состояния решаемой проблемы, цель и задачи данной работы, ее актуальность, обоснование необходимости проведения данной НИР и сведения о том, проводится ли работа впервые или является продолжением ранее начатых работ. При проведении НИР, базирующихся на результатах фундаментальных исследований, указывают, на основе каких исследований проводят данную работу (открытия, изобретения и т.д.).

- разделе «Исполнители НИР» указывают головного исполнителя (исполнителя) НИР и исполнителей (соисполнителей) основных составных частей НИР.



При указании соисполнителей должно быть оговорено, в какой части НИР они участвуют.

- разделе «Этапы НИР» указывают наименование этапов НИР и содержание работ, выполнение которых должно обеспечить достижение поставленных в НИР целей, с указанием этапов, подлежащих приемке заказчиком.

Этапы НИР и их содержание устанавливаются в соответствии с требованиями стандарта на порядок выполнения НИР, с учетом характера

- целевого назначения НИР, на которую составляют ТЗ. Последовательность выполнения НИР, количество этапов и их содержание зависят от направленности исследований, характера и сложности НИР, степени разработанности темы. Каждый этап НИР должен решать конкретные задачи, необходимые для успешного проведения последующего этапа и уточнения содержания и направления НИР в целом.

- разделе «Этапы НИР» указывают наименования этапов разработки
- сроки их выполнения, краткое содержание работы и чем заканчивается работа.
- общем случае НИР должна содержать следующие этапы:
- выбор направления исследований;
- теоретические и экспериментальные исследования;
- обобщение и оценка результатов исследований в научно-техническом отчете по НИР, выпуск ОНТД.
- зависимости от характера и сложности НИР, степени проработанности темы допускается исключение или дополнение отдельных этапов работы, разделение или совмещение этапов, а также уточнение состава работ (по согласованию с заказчиком НИР).

По комплексным темам, по которым не представляется возможным заранее определить все этапы и состав работ, ТЗ может составляться только на этап «Выбор направлений исследований». Техническое задание на последующие этапы работ составляют и утверждают после приемки первого этапа.

- разделе «Сроки выполнения НИР» указывают сроки (начало и окончание) выполнения НИР в целом, а также наиболее важных этапов составных частей НИР.
- разделе «Основные требования к выполнению НИР» приводят:
- краткую характеристику технического уровня изучаемого объекта по отечественным и зарубежным источникам;
- подробный перечень вопросов, которые должны быть исследованы;

- номенклатуру параметров, численные значения которых необходимо получить и точность их определения;
- перечень норм и технических требований, которым должны соответствовать результаты исследований, при завершении НИР;
- предполагаемые методы и объемы исследований;
- требования к способам обработки первичных материалов и к точности обработки результатов исследований;
- способы моделирования объектов исследований (математическое моделирование, физические модели, макеты, экспериментальные образцы и их количество, состав разрабатываемой для их изготовления документации).

• разделе указывают основные требования, предъявляемые к НИР, обеспечивающие выполнение стоящих перед НИР задач, в том числе требования к математическому обеспечению, способам и точности обработки результатов исследований, к проведению моделирования, требования по проведению поэтапных патентных исследований и составление отчета о них, а также устанавливают предполагаемые результаты. Кроме того, следует указывать, чем должна заканчиваться работа по теме (разработкой рекомендаций и предложений по реализации результатов НИР, проекта ТЗ на выполнение аванпроекта, проекта ТЗ на ОКР, нормативно-технических и других технических документов), а также возможное практическое использование и целесообразность внедрения

результатов исследований в организациях заказчика и промышленности. При наличии у НИР составных частей в ТЗ должны быть указаны составные части НИР, ТЗ на которые подлежат согласованию с заказчиком.

• разделе указывают необходимость разработки, изготовления и испытания макетов (моделей, экспериментальных образцов), количество, необходимость разработки на них конструкторской, другой технической документации и ее состав, в том числе состав и сроки разработки документации по защите макетов (моделей, экспериментальных образцов) от иностранных технических разведок (ИТР) при их разработке, изготовлении и испытаниях в соответствии с действующими нормативными документами органов государственного управления по обеспечению защиты информации от ИТР.

Для НИР по вопросам определения принципов и путей создания новых и улучшения существующих образцов техники, а также для НИР, заканчивающихся разработкой проектов ТЗ на ОКР по разработке (модернизации) образцов, должны быть

указаны требования по разработке вопросов (предложений) обоснования требований по защищенности образца и процесса его создания от ИТР.

Исходя из целей и задач НИР, приводят требования по изысканию научно-технических путей унификации предполагаемого к созданию (модернизации) образца, в том числе по заимствованию ранее разработанных составных частей образца, блочно-модульному построению образца, разработке образца в качестве базового и для создания его модификации, включая выявление объектов стандартизации, разработку предложений по стандартизации и унификации комплектующих изделий, материалов и сырья.

Кроме того, излагают требования по проработке вопросов использования, утилизации или уничтожения предлагаемых к созданию (модернизации) изделий.

- разделе приводят также требования по исследованию возможности использования в предлагаемом к созданию (модернизации) образце техники новых или известных изобретений и других научно-технических достижений. Необходимые данные приводят в отчете о патентных исследованиях, если он прилагается к ТЗ на НИР.

- разделе «Тактико-технические (технические) требования» в зависимости от характера и содержания конкретной НИР указывают состав образца, требования, определяемые его назначением, условиями эксплуатации и применения, перспективные показатели качества, а также требования по совместимости, взаимозаменяемости и обеспечению безопасности для жизни и здоровья людей и охране окружающей среды.

- разделе также указывают необходимость проработки предложений по защите от ИТР образца техники (в том числе по различным физическим

полям, определяемым на основе действующих норм противодействия отдельным средствам ИТР либо обоснованным заказчиком) и по обоснованию требований к разрабатываемым средствам противодействия ИТР и контроля (технического диагностирования), требования по технологическому, метрологическому, программному, математическому, лингвистическому обеспечению и созданию учебно-тренировочных средств к образцу, специальных средств технического обслуживания, ремонта и др. В этом же разделе перечисляют стандарты, требованиям которых должен соответствовать предлагаемый к созданию (модернизации) образец.

В разделе «Технико-экономические требования» устанавливают:

- предельное значение стоимости выполнения НИР в целом и, при необходимости, предельные значения стоимости отдельных этапов НИР;
- модель цены и ее значение, которые должны быть установлены

- договоре;
- этап, на котором головной исполнитель (исполнитель) НИР должен проводить, при необходимости, технико-экономическое обоснование целесообразности продолжения исследований;
- необходимость определения головным исполнителем (исполнителем) НИР предполагаемых затрат на реализацию результатов НИР и др.
- разделе «Требования к разрабатываемой документации» указывают конкретный состав ОНТД, установленный в ГОСТ В 15.110 [12]
- других технических и организационно-методических документов (методик, программ, расчетов экономической эффективности от реализации НИР, положений, инструкций, наставлений, руководств, учебных пособий), разрабатываемых и предъявляемых к приемке на этапах НИР и по НИР в целом. При этом указывают способ выполнения документации (машинопись, фотокопии, светокпии, магнитные носители
- др.), а также количество комплектов документации, оформляемой исполнителем НИР после окончания этапов и всей НИР в целом, в том числе количество комплектов документации, представляемых заказчику.
- разделе «Порядок реализации результатов НИР» приводят требования к составлению проекта ТЗ на ОКР, а также требования к разработке предложений (проекта плана мероприятий) по реализации результатов НИР с указанием объектов, где целесообразно их использование. В приложениях к ТЗ на НИР, при необходимости, допускается приводить таблицы, графики, схемы, перечень справочно-информационных и других технических материалов и документов, необходимых для выполнения работ, перечень заинтересованных организаций, с которыми подлежат согласованию при выполнении НИР конкретные вопросы исследований и технические решения.

Раздел «Перечень технической документации, предъявляемой по окончании работ» указывают документы, предъявляемые по завершении отдельных этапов и НИР в целом для рассмотрения, согласования и приемки (научно-технические отчеты, отчеты о патентных исследованиях, методики, программы и протоколы испытаний). Перечень технической документации обычно представляют в виде таблицы.

- разделе «Порядок выполнения и приемки НИР (этапов НИР)» указывают порядок выполнения и приемки НИР и ее этапов, а также необходимость разработки программы приемки НИР (этапов НИР) в соответствии с требованиями,

установленными в стандартах на выполнение НИР. Если в ТЗ составление программы приемки не предусмотрено, то в разделе приводят необходимые требования к проведению приемки, а также перечень предъявляемых к приемке технических документов, макетов (моделей, экспериментальных образцов).

- разделе «Технико-экономическое обоснование» указывают:
- технические и эксплуатационные показатели, соответствующие или превышающие лучшие отечественные или зарубежные показатели;
- экономические показатели;
- показатели ориентировочной экономической эффективности от внедрения продукции;
- рекомендации по снижению затрат на разработку и изготовление опытных образцов изделия;
- рекомендации по повышению уровня унификации и стандартизации при разработке новых изделий.

Раздел «Дополнительные сведения» приводят при необходимости. Раздел может включать требования по обеспечению секретности и другие специальные требования.

- разделе «Приложения» приводят таблицы, схемы, перечни справочно-информационных и патентных материалов, перечень нового технологического оборудования, подлежащего разработке и т.п.

- зависимости от специфики проводимой НИР допускается уточнять содержание разделов, объединять отдельные разделы и вводить новые. Если при разработке ТЗ требования по отдельным разделам не предъявляются, то в нем рекомендуется делать запись типа: «Требования по ... не предъявляются», если те или иные требования при разработке ТЗ не могут быть установлены, то в нем рекомендуется делать запись типа: «Требования по ... уточняются (устанавливаются) на этапе...». В процессе исследований по инициативе заказчика или исполнителя в задание могут вноситься изменения и дополнения (исключение, расширение, углубление отдельных позиций, разделение и совмещение этапов, уточнение их содержания и т.д.). Согласование и утверждение коррективов осуществляются в том же порядке, что и для ТЗ на НИР. На титульном листе ТЗ в этом случае делается запись: «Действует совместно с дополнением №\_».

Текст технического задания должен быть кратким, точным, не допускающим различных толкований, логически последовательным, достаточным для понимания целей и задач намеченных к проведению работ и ожидаемых результатов НИР. ТЗ на

НИР оформляется в соответствии с общими требованиями к текстовым документам, установленными ГОСТ 2.105 [5] на листах формата А4 по ГОСТ 2.301 [13] без рамки основной надписи и дополнительных граф к ней. Номера листов (страниц) проставляют в правом верхнем углу листа (над текстом).

Техническое задание является правовым документом, определяющим не только обязанности, но и права авторского коллектива в вопросах получения информации по теме, консультаций со специалистами, реализации научных результатов. При необходимости эти права могут оговариваться в ТЗ.

При уяснении содержания задания головной (ответственный) исполнитель окончательно определяет состав авторского коллектива. Он комплектуется с учетом научной специализации сотрудников, их базовой подготовки и взаимной дополняемости, т.е. таким образом, чтобы этот коллектив был способен провести комплексное исследование темы.

Если в выполнении НИР участвуют внешние исполнители (соисполнители), то на основе ТЗ для таких НИР разрабатываются частные ТЗ соисполнителям, рабочая программа выполнения НИР и план-проспект промежуточного отчета. Частные задания соисполнителям разрабатываются головным (ответственным) исполнителем НИР в месячный срок после получения от заказчика утвержденного задания и принятия НИР к разработке.

Частное ТЗ разрабатывается по той же форме, что и основное. Подписывает его научный руководитель, а утверждает руководитель организации. В частном задании определяются лишь те вопросы НИР, которые поручаются разработать (исследовать) соисполнителю. Утвержденное частное ТЗ должно быть выдано соисполнителю НИР не позднее, чем за десять дней до начала выполнения работы.

#### **1.4.2 Планирование и управление выполнением НИР**

**Назначение авторского коллектива НИР.** По каждой принятой к разработке теме НИР приказом по организации-исполнителю назначается (как правило, из числа научно-исследовательских подразделений) авторский коллектив в составе научного руководителя, ответственного исполнителя и исполнителей. Непосредственными организаторами исследований по НИР являются научный руководитель и ответственный исполнитель. Научный руководитель НИР назначается из числа руководителей организации-исполнителя, руководителей научно-исследовательских подразделений, их заместителей и наиболее подготовленных сотрудников, имеющих ученую степень, опыт руководства авторским коллективом и хорошие организаторские способности. Он организует и лично участвует в проведении исследований, отвечает за качество, полноту и своевременность разработки исследуемой проблемы,

формирование отчетной документации, новизну, научный уровень, практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных результатов, организацию и методическое обеспечение исследования.

Ответственный исполнитель НИР, как правило, назначается из числа начальников отделов, их заместителей и наиболее опытных главных научных и ведущих научных сотрудников. Он проводит исследования в соответствии с утвержденной рабочей программой и отвечает за организацию и качество разработки плановой, учетной и отчетной документации по НИР, подготовку совещаний (семинаров) по теме, обеспечение соблюдения требований режима секретности при выполнении

- оформлении документации, а также за научную обоснованность, качество и своевременность выдачи научных результатов.

#### ***Разработка рабочей программы выполнения НИР.***

Головной (ответственный) исполнитель совместно с научным руководителем, руководствуясь ТЗ и договором, разрабатывает рабочую программу выполнения НИР. Подписывает ее научный руководитель, а утверждает руководитель организации.

Рабочая программа, по существу, сама является продуктом научной деятельности. Основой для ее составления служит полученная в ходе предварительной проработки запланированной темы информация об объекте исследования, целях, задачах НИР и возможностях по их достижению и решению. Рабочая программа организует групповой исследовательский процесс на всем его протяжении. Обычно она включает в себя:

- обоснование и изложение целей, задач и направлений исследования;
  - методологию предстоящей работы и последовательность выполнения исследований по конкретным вопросам, обобщения и анализа полученных данных;
  - укрупненный расчет распределения членов авторского коллектива по исследуемым вопросам и задачам;
  - определение сроков выполнения работ, трудозатрат выходных результатов;
  - предложения о внедрении (реализации) прогнозируемых результатов НИР.
  - рабочей программе должно быть определено не только то, что надо сделать, но и то, как сделать, то есть по каждому вопросу указываются методы исследования.
- При организации работы по запланированной теме исследования авторскому коллективу, прежде всего, необходимо особое внимание направить на определение (выбор или самостоятельную разработку) методики исследования, то есть совокупность методов и приемов его проведения. При выборе методики используется не только личный опыт, но и опыт авторских коллективов. К

разработке рабочей программы необходимо привлекать высококвалифицированных специалистов различного профиля и отводить на это достаточно времени. Вне всякого сомнения, научными коллективами при проведении исследований широко будут применяться общенаучные методы – интуитивно-логические, логические, исторические, эвристические, экстраполяции, системного анализа, моделирования, эмпирический.

***Организация сбора и обработки научной информации, методики теоретических и экспериментальных исследований.*** При организации исследований не существует универсальных рецептов по применению стандартных методов решения научных проблем, а нетворческое использование ранее апробированных методов научных исследований может дать противоположный эффект. Следовательно, организация исследования требует тщательно осуществлять выбор рекомендаций методического и методологического характера. В связи с этим в подготовке и обсуждении рабочих программ, в которых намечаются используемые в НИР методы научных исследований, должны участвовать все научные сотрудники, которые будут участвовать в работе по данной НИР, то есть весь авторский коллектив, в том числе руководящий состав научно-исследовательских подразделений.

Сбор и обработка материалов, относящихся к теме исследования, ведутся согласно рабочей программе и начинаются после того, как исследуемый вопрос в достаточной степени уяснен. Перечень необходимой информации в общем виде определяется уже на этапе предварительной проработки темы. Ее поиск начинается с изучения библиографических карточек и каталогов, аннотированных указателей. Часто используют список литературы, приведенный в конце более поздних источников, полно и достоверно освещающих исследуемую тему. Регламент и рамки поиска определяет ответственный исполнитель, а затем согласовывает их с научным руководителем темы. Сущность сбора и обработки материалов по теме исследований заключается в том, что децентрализованная, рассредоточенная по разным источникам информация собирается воедино и должным образом организовывается (систематизируется). Выписки из источников делаются целенаправленно, в соответствии с рабочей программой НИР. Исследователи как бы «ведут

источник за собой», то есть собирают материал, выписывают из книг, статей, нормативных актов и т.п. все, что им потребуется для разработки темы.

Следует, однако, отметить, что при сборе материала возможны и отклонения от рабочей программы НИР. Изучение источников может выявить совершенно новый материал, раскрывающий и углубляющий решение поставленной задачи с



непредвиденной, но в то же время научно оправданной стороны. В таком случае ранее разработанную рабочую программу исследуемой темы целесообразно уточнить, ввести в нее новые позиции. Говоря о значении фактов для научных обобщений, В.Г. Белинский писал: «В науке должно искать идеи. Нет идеи, нет и науки. Знания фактов только потому и драгоценно, что в фактах скрываются идеи; факты без идей – сор для головы и памяти» [51].

На этапе сбора и обработки информации, как показывает опыт, имеются значительные резервы для интенсификации научно-исследовательской работы: во-первых, за счет сокращения сроков, а во-вторых, за счет качества извлекаемой информации. Первое достигается

правильно организованным процессом сбора сведений, совершенствованием поискового аппарата информационных систем, оптимальным распределением всего объема работы между членами авторского коллектива; второе - более полным и умелым использованием источников информации. Нередко научные сотрудники ищут в изучаемых материалах готовые решения, прямые ответы на интересующие вопросы, которые соответствовали бы первоначальным моделям и версиям. Это неверно. Творческим коллективам целесообразно выходить на выводы, обобщения и новые знания путем исследования, оценки и обработки информационных материалов согласно методологии разработки исследуемой темы.

*Методики теоретических исследований* определяют общую структуру теоретического исследования и методики решения главной и вспомогательной задач в соответствии с названием темы и поставленной проблемой.

Теоретические исследования являются творческими, направленными на создание новых научных гипотез, глубокое объяснение неизученных явлений или процессов, обобщение отдельных явлений или процессов, обоснование стратегии и тактики научных исследований, а также решении других подобных задач.

Научные исследования базируются на интеллектуальной деятельности (мышлении) человека – исследователя. Важнейшим элементом теоретического исследования является умственный труд. Существует большое количество методик теоретического исследования, поэтому выбор можно делать только в соответствии с конкретной научной проблемой.

- основным принципам научного труда, в котором теоретические исследования составляют базисный компонент научного результата, следует отнести:
- постоянно думать о предмете исследования. Так И.Ньютон на вопрос о том, как он сумел открыть законы небесной механики, ответил: «Очень просто, я все время думал о них». Из этого принципа следует два практических вывода: нельзя

заниматься научной работой только на работе, человек должен думать о предмете своего исследования постоянно;

- не работать без плана. При научном исследовании сначала пишется укрупненный план, а затем в процессе теоретических исследований его детализируют и корректируют;
- контролировать ход работы в процессе теоретических исследований. По результатам постоянного контроля хода исследований осуществляется корректировка работ и выполняется анализ научных результатов.

*Методики экспериментальных исследований* – это общая структура, последовательность и приемы выполнения экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования подтверждают теоретические понятия, законы, принципы на практике и являются базой для подтверждения достоверности полученных научных результатов сформулированных в гипотезе научных исследований по выбранной теме.

Эксперимент и теория взаимосвязаны:

- теория позволяет обосновывать методику эксперимента;
  - эксперимент позволяет оценить справедливость теории.
- Экспериментальные исследования состоят из трех этапов:

планирование, эксперимент и анализ (обработка результатов).

- подавляющем большинстве случаев эксперимент является многофакторным опытом. Многофакторность эксперимента дает возможность изложения его стратегии после очередного этапа. Многофакторный эксперимент базируется на общематематическом аппарате, основы которого были заложены в трудах Р. Фишера.

Приступая к эксперименту необходимо: составить программу, обосновать методику, определить последовательность и составить календарный план, выбрать измерительную аппаратуру, произвести измерения и оценку измерений.

Математическая теория эксперимента и его планирование, предусматривающее изменение всех исследуемых факторов (измеряемых параметров) по определенному плану и учитывающее их взаимодействие – качественно новый подход к исследованию с применением ЭВМ для обработки результатов факторного эксперимента. Это направление в экспериментальных исследованиях получило название «вычислительный эксперимент».

Важным разделом методики экспериментальных исследований является обработка и анализ данных. Особое внимание в подборе методики эксперимента должно быть

уделено математическим методам обработки и удобным формам записи результатов в виде таблиц, графиков, формул, диаграмм и т.п.

**Патентные исследования.** Патентные исследования в полном объеме в соответствии с ГОСТ Р 15.011 [34] проводят на начальной стадии НИР, а в дальнейшем на всех стадиях НИОКР, связанных с созданием, производством, реализацией, совершенствованием и использованием продукции производственного назначения, рекомендуется дополнять исследования изучением всех новых материалов. Это определяется тем, что объектами патентной защиты могут быть как сами изделия во всех аспектах их исполнения (схемы, конструкции, технологии изготовления и т.п.), так и методы (способы) использования при эксплуатации (способы измерений, регистрации, обработки информации и т.п.). Соответственно при решении вопросов правовой охраны объектов промышленной и интеллектуальной собственности патентные исследования должны проводить как исполнители НИОКР, так и изготовители, и потребители продукции, т.е. исполнители любых программ развития производства и использования объектов техники.

При выполнении НИР патентные исследования рекомендуется предусматривать в ТЗ, в том числе в отношении результатов патентных исследований, условий конфиденциальности, а также ответственности сторон за последствия, вызванные выполнением их в ограниченном объеме или отказом от использования их результатов. Необходимость проведения патентных исследований при выполнении составных частей работ или при разработке комплектующих изделий, материалов, технологии, осуществляемых по исходному техническому заданию, определяет головной исполнитель работы. Результаты патентных исследований отражаются в технических условиях и стандартах на разработанную продукцию, в документации, связанной с оценкой технического уровня и качества продукции, в документации, связанной с обеспечением охраны объектов промышленной собственности в стране и за границей (изобретения, полезные модели, промышленные образцы, товарные знаки). Результаты патентных исследований не подлежат передаче за границу в составе комплектов документации, если это не оговорено в договоре (контракте).

Патентными исследованиями, как правило, должно предусматриваться:

- исследование направлений научно-исследовательской и производственной деятельности организаций и фирм, которые действуют на рынке продукции; обоснование требований по совершенствованию и созданию новой продукции и технологии, по обеспечению эффективности применения и конкурентоспособности продукции и услуг;

- обоснование предложений о целесообразности разработки новых объектов промышленной собственности для использования в объектах техники, обеспечивающих достижение технических показателей, предусмотренных в техническом задании;

- выявление технических, художественно-конструкторских, программных и других решений, созданных в процессе выполнения НИОКР, с целью отнесения их к охраноспособным объектам промышленной и интеллектуальной собственности;

- обоснование целесообразности правовой охраны объектов интеллектуальной и промышленной собственности в стране и за рубежом, выбор стран патентования;

- экспертиза объектов техники на патентную чистоту, обоснование мер по обеспечению их патентной чистоты и беспрепятственному производству и реализации объектов техники в стране

- за рубежом.

Конкретное содержание патентных исследований определяют в зависимости от характера проводимой работы и стадий жизненного цикла объекта техники.

Порядок проведения патентных исследований включает:

- определение задач и разработку задания на проведение патентных исследований;

- определение требований к поиску патентной и другой документации;

- поиск и отбор патентной и другой документации и оформление отчета о поиске;

- систематизацию и анализ отобранной документации, подготовку выводов и рекомендаций;

- оформление результатов исследований в виде отчета.

Отчет о патентных исследованиях должен содержать общие данные об объекте исследований, основную (аналитическую) часть, заключение и приложения.

Аналитическая часть отчета в общем случае включает разделы:

- технический уровень и тенденции развития объекта;

- использование объектов промышленной (интеллектуальной) собственности и их правовая охрана;

- исследование патентной чистоты объекта техники.

Включение конкретных разделов в аналитическую часть отчета определяется заданием на проведение исследований.

В заключении приводят:

- обобщенные выводы по результатам проведенных патентных исследований;
- предложения по использованию результатов патентных исследований для совершенствования научно-технической и производственной продукции.
- приложения к отчету включают:
  - задание на проведение исследований;
  - регламент поиска;
  - отчет о поиске;
  - описания изобретений;
  - аннотации документов и другие справочные материалы, отобранные при проведении поиска.

### **1.4.3 Отчет о НИР**

Изучение и анализ собранных материалов творческим коллективом осуществляются в соответствии с целями и задачами исследования. Целью данного этапа НИР является подготовка и написание выходных документов по теме. Однако этому предшествует напряженная творческая работа, глубокое и всестороннее обдумывание не только основных положений, но и деталей будущего изложения. Вынашивание основных идей исследовательской работы - процесс сложный, требующий большой сосредоточенности и труда. Собранные, обработанные материалы надлежит превратить в стройное, последовательное, научно аргументированное изложение, то есть написать текст основного выходного документа - отчета о НИР. Это требует большого труда и опыта. Написание текста итогового отчета - венец всей работы, вершина творческой деятельности авторского коллектива. Однако даже самым квалифицированным и опытным научным сотрудникам не удастся сразу написать текст отчета о НИР на уровне, полностью отвечающем требованиям не только ГОСТ, но и литературного языка. Обычно после написания материалов отчета в так называемом первом варианте их доделывают и даже переделывают, совершенствуя текст.

Разработка отчета о НИР завершается редактированием его материалов. Поэтому, планируя рабочее время, отводимое на изложение результатов научного исследования, целесообразно резервировать определенную его часть (до 20-25%) для редактирования и других доработок.

Отчет о научно-исследовательской работе составляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32 [25].

Отчет о НИР – научно-технический документ, который содержит систематизированные данные о научно-исследовательской работе, описывающий процесс, результаты научно-технического исследования и состояние научно-технической проблемы.

Отчет о НИР подлежит обязательному нормоконтролю в организации-исполнителе.

**Структура отчета.** Структурными элементами отчета о НИР являются:

- титульный лист;
- список исполнителей;
- реферат;
- содержание;
- перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Структурные элементы с 1 по 3 и с 6 по 8 являются обязательными. Остальные структурные элементы включают в отчет по усмотрению исполнителя НИР.

**Титульный лист.** Титульный лист является первой страницей отчета о НИР и служит источником информации, необходимой для обработки и поиска документа.

На титульном листе приводят следующие сведения:

- наименование организации - исполнителя НИР;
- индекс УДК;
- коды Высших квалификационных группировок Общероссийского классификатора продукции для НИР, предшествующей постановке продукции на производство;
- номера, идентифицирующие отчет;
- грифы согласования и утверждения;
- наименование работы;
- наименование отчета;

- вид отчета (заключительный, промежуточный);
- номер (шифр) темы;
- должности, ученые степени, ученые звания, фамилии и инициалы руководителей организации - исполнителя НИР, руководителей НИР;
- место и дата составления отчета.

**Реферат.** Общие требования к реферату на отчет о НИР изложены в ГОСТ 7.9 [23].

Реферат должен содержать:

- сведения об объеме отчета, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве книг отчета, количестве использованных источников;
- перечень ключевых слов;
- текст реферата.

Текст реферата должен отражать:

- объект исследования или разработки;
- цель работы;
- метод исследования и аппаратуру;
- полученные результаты и их новизну;
- основные конструктивные, технологические и технико-экономические характеристики;
- степень внедрения;
- рекомендации по внедрению или итоги внедрения результатов НИР;
- область применения;
- экономическую эффективность или значимость работы;
- прогнозные предложения о развитии объекта исследования.

Если отчет не содержит сведений по какой-либо из перечисленных структурных частей реферата, то в тексте реферата она опускается, при этом последовательность изложения сохраняется.

**Содержание.** Содержание включает введение, наименование всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование) и заключения с указанием номеров страниц, с которых начинаются элементы отчета о НИР.

- отчете о НИР объемом не более 10 страниц содержание допускается не составлять.

***Перечень сокращений, условных обозначений, символов, единиц и терминов.***

Общие требования и правила сокращения слов и словосочетаний на русском языке в библиографических записях и библиографических ссылках на все виды документов изложены в ГОСТ Р 7.0.12-2011 [27], сокращение слов и словосочетаний на иностранных европейских языках – в ГОСТ 7.11 [24], сокращение слов, обозначающих единицы величин, – в ГОСТ 8.417 [28].

***Введение.*** Введение должно содержать оценку современного состояния решаемой научно-технической проблемы, основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения НИР, сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них, сведения о метрологическом обеспечении НИР. Во введении должны быть показаны

актуальность и новизна темы, связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.

***Основная часть.*** Основная часть отчета должна содержать данные, отражающие существо, методику и основные результаты выполненной НИР.

Основная часть должна содержать:

- выбор направления исследований, включающий обоснование выбора принятого направления исследования, методы решения задач и их сравнительную оценку, разработку общей методики проведения НИР;
- теоретические и (или) экспериментальные исследования, включающие определение характера и содержания теоретических исследований, методы исследований, методы расчета, обоснование необходимости проведения экспериментальных работ, принципы действия разработанных объектов, их характеристики, обоснования выбора метрологического обеспечения работ, данные об объектах измерений, измеряемых величинах и средствах измерений, их метрологические характеристики, оценку правильности и экономичности выбора средств измерений и методик измерений, сведения об аттестации, оценку погрешности измерений, полученные экспериментальные данные;
- обобщение и оценку результатов исследований, включающие оценку полноты решения поставленной задачи и предложения по дальнейшим направлениям работ, оценку достоверности полученных результатов и их сравнение с аналогичными результатами отечественных и зарубежных работ, обоснование необходимости



проведения дополнительных исследований, отрицательные результаты, приводящие к необходимости прекращения дальнейших исследований.

- зависимости от особенностей выполнения НИР основную часть излагают в виде текста, таблицы, сочетания иллюстраций и таблиц или сочетания текста, иллюстраций и таблиц.

**Заключение.** Заключение должно содержать:

- краткие выводы по результатам выполненной НИР или отдельных ее этапов, оценку полноты решений поставленных задач, разработку рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов НИР, оценку технико-экономической эффективности внедрения;
- оценку научно-технического уровня выполненной НИР в сравнении с лучшими достижениями в данной области.

**Список использованных источников.** Общие требования и правила составления библиографической ссылки в списке использованных источников (основные виды, структуру, состав, расположение в документах) изложены в ГОСТ Р 7.0.5 [26].

#### **1.4.4 Приемка этапов НИР и НИР в целом**

Приемка этапов НИР заключается в рассмотрении и оценке результатов выполненных работ, качества представленной ОНТД и других материалов по этапу в соответствии с требованиями ТЗ и контракта (договора), а так же в подтверждении результатов исследований проведением испытаний макетов, если это указано в ТЗ или контракте.

- приемке этапа предъявляют: утвержденную ОНТД завершеного этапа, проект программы приемки этапа (если она разрабатывалась), протокол о рассмотрении этапа НИР на научно-техническом совете (НТС) или секции НТС, а так же другие технические материалы, предусмотренные ТЗ и контрактом.

Этап НИР принимает комиссия, необходимость создания которой, ее состав и сроки работы устанавливает руководство исполнителя НИР по согласованию с заказчиком.

Результаты приемки оформляют актом приемки этапа НИР, утверждаемым руководством исполнителя НИР. Утвержденный акт является основанием для того, чтобы считать этап НИР завершенным.

После приемки этапов НИР исполнитель НИР оформляет ОНТД и другие материалы по НИР в целом, которые должны быть рассмотрены на НТС.

Приемку НИР осуществляют постоянно действующей или специально создаваемой комиссией. Основанием для приемки НИР является приказ (распоряжение) руководства исполнителя НИР и (или) заказчика о приемке НИР. В приказе указывают наименование НИР, состав комиссии, цели и задачи комиссии, место и сроки проведения работ по приемке НИР.

На приемку НИР исполнитель НИР представляет: – утвержденное ТЗ;

- утвержденные акты приемки завершенных этапов НИР;
- утвержденный научно-технический отчет по НИР и другую ОНТД по НИР, предусмотренную ТЗ и контрактом;
- макеты, программы и методики испытаний макетов, если это предусмотрено ТЗ и контрактом;
- рекомендации и предложения по реализации и использованию результатов НИР.

Приемка НИР заключается в рассмотрении и проверке результатов выполненных работ на соответствие ТЗ, анализе качества принятых технических решений, а при необходимости и в подтверждении результатов исследований проведением испытанием макетов.

При приемке НИР оценивают научно-технический уровень исследований, обоснованность предлагаемых решений и рекомендаций по

реализации и использованию результатов НИР для создания конкурентоспособной продукции и услуг.

По результатам приемки НИР комиссия оформляет акт приемки НИР.

Датой окончания НИР считают дату утверждения акта приемки НИР. Следует отметить, что изложенные выше методические подходы и рекомендации по подготовке и выполнению научных исследований носят общий характер. Использовать их в каждой конкретной НИР необходимо творчески, в соответствии с проблематикой научных исследований в современных условиях.

### **1.5 Общие требования к организации и выполнению ОКР**

Общие требования к организации и выполнению ОКР (ОТР), порядок выполнения и приемки ОКР, этапы выполнения ОКР, правила их выполнения и приемки, порядок разработки, согласования и утверждения документов в процессе организации и выполнения ОКР и порядок реализации результатов ОКР устанавливаются:

- ГОСТ Р 15.201 [35] – для серийной и повторяющейся несерийной продукции производственно-технического назначения, собираемой на предприятии-изготовителе

- ГОСТ РВ 15.203 [42] – для опытных образцов изделий военной техники (ВТ).

Разработка и постановка продукции на производство в общем случае предусматривает:

- разработку ТЗ на ОКР;
  - проведение ОКР, включающей:
  - техническое предложение (ПТ);
  - эскизный проект (ЭП);
  - технический проект (ТП);
  - разработку РКД, программной (ПД) и технологической документации (ТД)
- при выполнении ОТР;

- изготовление опытных образцов;
- испытания опытных образцов;
- приемку результатов ОКР;
- постановку на производство, включающую:
- подготовку производства;
- освоение производства;
- изготовление установочной серии;
- квалификационные испытания.
- Отдельные из указанных работ можно совмещать и дополнять другими работами в зависимости от специфики продукции и организации ее производства.

Стадии разработки конструкторской документации и этапы выполнения работ определены ГОСТ 2.103 [4].

- процессе выполнения ОКР (СЧ ОКР) должно быть обеспечено соблюдение требований ТЗ, в том числе разработаны и реализованы требования:

– по обоснованию возможностей выполнения требований генерального заказчика (заказчика), установленных в ТЗ на ОКР (СЧ ОКР); – по обеспечению качества при обосновании технических

решений и вариантов разрабатываемых изделий; – по обеспечению надежности изделия;

– по обеспечению стойкости изделия к внешним воздействующим факторам при эксплуатации;

- по ограничению номенклатуры применяемых материалов и комплектующих изделий;
- по анализу соответствия заимствованных комплектующих изделий условиям применения в разрабатываемой продукции;
- по анализу ремонтпригодности, совместимости и взаимозаменяемости разрабатываемых изделий при эксплуатации;
- по анализу возможности применения типовых технических решений, обеспечивающих утилизацию отработавшей продукции, ее составных частей, отходов производства, для соблюдения требований экологии (охраны окружающей среды) и безопасности для жизни и здоровья людей;
- по технологичности;
- по обеспечению совместимости с совместно эксплуатируемой аппаратурой;
- по стандартизации, унификации и метрологическому обеспечению;
- по математическому, программному и лингвистическому обеспечению и обеспечению безопасности информации.

При выполнении ОКР (СЧ ОКР) в соответствии с ГОСТ РВ 15.203

- устанавливаются этапы, а также объем и порядок выполнения работ по каждому этапу.

ОКР (СЧ ОКР) выполняется под руководством руководителя проекта, который назначается приказом руководителя организации-исполнителя. Руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) несет ответственность за качество разработки и ее научно-технический уровень, а также за обеспечение внедрения результатов ОКР (СЧ ОКР) в установленные сроки.

Ответственность и обязанности должностных лиц и подразделений организации-исполнителя при проведении ОКР (СЧ ОКР) устанавливается должностными инструкциями персонала, положениями о подразделениях, планами-графиками выполнения работ.

Ответственность за обеспечение своевременной разработки и осуществление необходимых мероприятий по защите государственной тайны и информации в соответствии с требованиями ТЗ, в ходе подготовки

- проведения ОКР, мероприятий в соответствии с требованиями законодательства в области экспортного контроля, как и ответственность за нарушение режимных требований и требований конфиденциальности, возлагается на руководителя ОКР и руководителей соответствующих структурных подразделений.

Основанием для выполнения ОКР (СЧ ОКР) является ТЗ и контракт (договор) между исполнителем и заказчиком (генеральным заказчиком) работ. При выполнении ОКР (СЧ ОКР) в соответствии с ГОСТ РВ 15.203

- устанавливаются этапы, а также объем и порядок выполнения работ по каждому этапу.

### **1.5.1 Техническое задание на ОКР**

**Общие требования к разработке ТЗ на ОКР.** Общие требования к разработке ТЗ на ОКР в части народно-хозяйственной продукции производственно-технического назначения изложены в разделе 5 ГОСТ Р 15.201 [35]. В данном стандарте указывается, что при разработке ТЗ разработчик учитывает информацию об аналогичной продукции, содержащуюся в базах данных (общероссийской и региональных), созданных в Госстандарте России на основе каталожных листов продукции. В ТЗ рекомендуется указывать технико-экономические требования к продукции, определяющие ее потребительские свойства и эффективность применения, перечень документов, требующих совместное рассмотрение, порядок сдачи и приемки результатов разработки, а также предусматривают реализацию всех обязательных требований, распространяющихся на данную продукцию (не допускается включать в ТЗ требования, которые противоречат законам Российской Федерации и обязательным требованиям) и указывают предусмотренную законодательством форму подтверждения соответствия продукции обязательным требованиям.

В ТЗ рекомендуется предусматривать следующие положения:

- прогноз развития требований на данную продукцию на предполагаемый период ее выпуска;
- рекомендуемые этапы модернизации продукции с учетом прогноза развития требований; соответствие требованиям стран предполагаемого экспорта с учетом прогноза развития этих требований;
- характеристики ремонтпригодности;
- возможность замены запасных частей без применения промышленной технологии;
- доступность и безопасность эффективного использования продукции инвалидами и гражданами пожилого возраста (для соответствующей продукции, предусмотренной законодательством Российской Федерации).

ТЗ разрабатывают и утверждают в порядке, установленном заказчиком и разработчиком. К разработке ТЗ могут привлекаться другие заинтересованные организации (предприятия): изготовитель, торговая (посредническая) организация,

страховая организация, организация-проектировщик, монтажная организация и др. Для подтверждения отдельных требований к продукции, в том числе требований безопасности, охраны здоровья и окружающей среды, а также оценки технического уровня продукции, ТЗ может быть направлено разработчиком или заказчиком на экспертизу (заключение) в сторонние организации. Решение по полученным заключениям принимают разработчик и заказчик до утверждения ТЗ. На любом этапе разработки продукции при согласии заказчика и разработчика в ТЗ или документ, его заменяющий, могут быть внесены изменения и дополнения, не нарушающие условия выполнения обязательных требований.

Однако следует заметить, что данным стандарте не лучшим образом

- в общих чертах представлен порядок разработки ТЗ и его структура. Достаточно полно и структурировано изложение вопросов,

связанных с требованиями к разработке ТЗ на ОКР (составную часть ОКР и на разработку комплектующего изделия), представлено в разделах 5, 6 и 7 ГОСТ РВ 15.201 [41].

Наиболее приемлемой является следующая структура построения ТЗ.

- Наименование, шифр ОКР, основание, исполнитель и сроки выполнения ОКР.

1.1 Наименование ОКР.

1.2 Основание для выполнения ОКР.

1.3 Исполнитель ОКР.

1.4 Срок выполнения ОКР.

- Цель выполнения ОКР, наименование и индекс изделия. 2.1 Цель ОКР.

2.2 Наименование и индекс образца.

- Тактико-технические требования к изделию

3.1 Состав изделия:

3.2

Требования

назначения

.3 Требования радиоэлектронной защиты

(электромагнитной совместимости).

3.4 Требования живучести и стойкости к внешним воздействиям.

3.5 Требования надежности.

3.6 Требования эргономики, обитаемости и техническо

эстетики

3.7 Требования к эксплуатации, хранению, удобству технического обслуживания и ремонта.

3.8 Требования транспортабельности.

3.9 Требования безопасности.

3.10 Требования обеспечения режима секретности.

3.11 Требования защиты ИТР.

3.12 Требования стандартизации и унификации.

3.13 Требования технологичности.

3.14 Конструктивные требования.

- Технико-экономические требования.

- Требования к видам обеспечения.

5.1 Требования к нормативно-техническому обеспечению.

5.2 Требования к метрологическому обеспечению

5.2 Требования к математическому, программному и информационно-лингвистическому обеспечению.

- Требования к сырью, материалам и комплектующим изделиям.

- Требования к консервации, упаковке и маркировке.

- Требования к учебно-тренировочным средствам.

- Специальные требования.

- Требования защиты государственной тайны при выполнении

ОКР.

11 Требования к порядку разработки конструкторской документации на военное время.

- Этапы выполнения ОКР.

- Порядок выполнения и приемки этапов ОКР.

Разумеется, предложенная структура является только схемой. Отдельные разделы при составлении ТЗ могут быть объединены, либо за ненадобностью опущены, допускается вводить и другие разделы при необходимости.

Следует также отметить, что в данном стандарте достаточно полно рассмотрены не только требования к построению, содержанию, изложению

- оформлению ТЗ, но и порядок его согласования и утверждения, а также порядок внесения изменений в утвержденное ТЗ.

***Особенности разработки ТЗ на создание автоматизированной системы и разработку программной документации.*** Требования к

разработке ТЗ на создание автоматизированной системы и разработку программных продуктов изложены в следующих документах:

- ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы;

- ГОСТ 19.201-78 Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.

Согласно ГОСТ 34.602 [22] в состав ТЗ следует дополнительно включать раздел «Характеристики объекта автоматизации», в котором следует привести:

- краткие сведения об объекте автоматизации или ссылки на документы, содержащие такую информацию;

- сведения об условиях эксплуатации объекта автоматизации и характеристиках окружающей среды.

А для систем автоматизированного проектирования (САПР) в данном разделе дополнительно приводят основные параметры и характеристики объектов проектирования.

При разработке ТЗ на программные продукты следует обращать внимание на формирование требований к функциональным характеристикам: к составу выполняемых функций, организации входных

- выходных данных, временным характеристикам и пр. Например, в требованиях к составу выполняемых функций указывается, что «программа должна обеспечивать возможность выполнения перечисленных ниже функций:

- функции создания нового (пустого) файла;
- функции открытия (загрузки) существующего файла;
- функции редактирования открытого (далее - текущего) файла путем ввода, замены, удаления содержимого файла с применением стандартных устройств ввода;

- функции редактирования текущего файла с применением буфера обмена операционной системы;

- функции сохранения файла с исходным именем;



- функции сохранения файла с именем, отличным от исходного;
- функции отправки содержимого текущего файла электронной почтой с помощью внешней клиентской почтовой программы;
- функции вывода оперативных справок в строковом формате (подсказок);
- функции интерактивной справочной системы;
- функции отображения названия программы, версии программы, копирайта и комментариев разработчика».

При формировании требований к организации входных данных, например, указывается, что «входные данные программы должны быть

организованы в виде отдельных файлов формата rtf, соответствующих RFC... Файлы указанного формата должны размещаться (храниться) на локальных или съемных носителях, отформатированных согласно требованиям операционной системы. Любой файл иного формата, но с расширением rtf, открываться не должен. Файлы <http://domain.net/file.rtf> или <ftp://domain.net/file.rtf> открываться не должны. Если файловая система отформатирована как FAT32, файлы с локального или съемного носителя, отформатированного, к примеру, в формате ext3, открываться не должны». Формирование требований к организации выходных данных производится аналогичным образом.

- при формировании требований к временным характеристикам следует уточнить требования к быстродействию программы, например, за какое время программа должна стартовать, открывать и закрывать файлы заданного объема.

- подразделе «Требования к составу и параметрам технических средств» указывают необходимый состав технических средств с указанием их основных технических характеристик. В состав технических средств следует включать оборудование не хуже того, на котором будет производиться разработка программного продукта. Например, «в состав технических средств должен входить IBM-совместимый персональный компьютер (ПЭВМ), включающий в себя:

- процессор Pentium-1000 с тактовой частотой, ГГц - 10, не менее;
- материнскую плату с FSB, ГГц - 5, не менее;
- оперативную память объемом, Тб - 10, не менее, и т.д.
- подразделе «Требования к информационной и программной совместимости» должны быть указаны требования к информационным структурам на входе и выходе и

методам решения, исходным кодам, языкам программирования и программным средствам, используемым программой.

При формировании требования к информационным структурам и методам решения, например, указывается, что «информационная структура файла должна включать в себя текст, содержащий разметку, предусмотренную спецификацией формата ttf.» или «требования к информационным структурам (файлов) на входе и выходе, а также к методам решения не предъявляются».

При описании требований к исходным кодам и языкам программирования, например, указывается, что «исходные коды программы должны быть реализованы на языке C<sup>++</sup>. В качестве интегрированной среды разработки программы должна быть использована среда Borland C<sup>++</sup> Buidер».

Требования к программным средствам, используемым программой могут сформулированы следующим образом: «Системные программные средства, используемые программой, должны быть представлены

лицензионной локализованной версией операционной системы такой-то.

Допускается применение пакета обновления такого-то».

### **1.5.2 Выполнение проектных стадий ОКР**

Выполнение проектных стадий, если они предусмотрены ТЗ, проводится согласно требованиям ГОСТ 2.118 [8], ГОСТ 2.119 [9] и ГОСТ 2.120 [10] соответственно. Перечень документов, разрабатываемых на проектных стадиях, устанавливается в ТЗ в соответствии с ГОСТ 2.102 [3] и ГОСТ 3.1102 [21].

На стадиях эскизного и технического проектирования в целях проверки конструктивных и (или) схемных решений разрабатываемого изделия, а также подтверждения принятых решений, при необходимости, разрабатываются, изготавливаются и испытываются макеты изделий и (или) их отдельных составных частей. Конструкторская документация макетов может выпускаться в виде эскизной документации в соответствии с ГОСТ 2.125 [11]. Испытания макетов проводятся в соответствии с программой и методикой испытаний, оформленных по ГОСТ 2.106 [6].

***Разработка технического предложения.*** После утверждения и согласования ТЗ переходят к разработке технического предложения (документам присваивается литера «П»). При этом выявляются варианты возможных решений, устанавливают их особенности и прорабатывают конструкции, проверяют варианты на патентную чистоту и конкурентоспособность, дают сравнительную оценку рассматриваемых вариантов с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий (если для этого требуется проверить

принцип работы изделий различных вариантов, а также сравнить их по энергетическим и эстетическим показателям, то изготавливают макеты), выбирают оптимальный вариант, обосновывают этот выбор и определяют требования к изделию и к последующей стадии его разработки.

**Разработка эскизного проекта.** Если это предусмотрено техническим заданием или протоколом рассмотрения технического предложения, то разрабатывают ЭП (документам присваивается литера «Э»). На этой стадии выполняют работы, необходимые для обеспечения предъявляемой к изделию требований и позволяющие установить принципиальные ее решения. При этом выполняют варианты возможных решений и прорабатывают их конструкции, изготавливают макеты для проверки принципов работы изделия, оценивают изделие на технологичность, а также определяют показатели стандартизации и унификации, соответствия изделия требованиям эргономики и технической эстетики, прорабатывают основные вопросы технологии изготовления (при необходимости). На стадии ЭП не повторяют работы, проведенные на стадии ПТ, если они не дают дополнительных данных.

Для опытных образцов изделий ВТ этап разработки эскизного проекта выполняют в соответствии с требованиями подраздела 5.2 ГОСТ РВ 15.203 [42]. Состав основных работ эскизного проекта устанавливается в соответствии с Приложения В ГОСТ РВ 15.203 [42] в объеме, согласованном с заказчиком. На стадии разработки эскизного проекта выполняется конструкторская проработка оптимального варианта разрабатываемого изделия, прорисовываются основные составные части, уточняются общий вид и параметры изделия. На стадии разработки эскизного проекта руководитель проекта ОКР или СЧ ОКР прорабатывают вопросы технологии изготовления разрабатываемого изделия, а также осуществляют оценку разрабатываемого изделия по показателям унификации и стандартизации по ГОСТ РВ 15.207 [43].

На стадии разработки эскизного проекта руководитель проекта ОКР или СЧ ОКР осуществляют проверку разрабатываемого изделия на патентную чистоту (если это предусмотрено ТЗ или контрактом) посредством проведения патентных исследований в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.011 [34].

На стадии эскизного проекта может одновременно вестись проработка нескольких вариантов разрабатываемого изделия. Руководитель проекта ОКР и СЧ ОКР проводят сравнительную оценку рассматриваемых вариантов разрабатываемого изделия по показателям качества (назначения, надежности, технологичности, стандартизации и унификации, экономическим, эстетическим, эргономическим и др.). При этом следует учитывать конструктивные и эксплуатационные особенности разрабатываемого и

существующих образцов, тенденции и перспективы развития отечественной и зарубежной техники в конкретной области. На основе анализа сравнительной оценки рассматриваемых вариантов конструкции руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) выбирает оптимальный вариант конструкции разрабатываемого изделия. Выбранный вариант конструкции обсуждается, анализируется и утверждается на НТС, оформляется протокол совещания.

- процессе разработки эскизного проекта осуществляется разработка
- обоснование решений по выполнению требований метрологического обеспечения. Разработку и обоснование решений по выполнению требований метрологического обеспечения проводится в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 1.1 [2].

При выполнении эскизного проекта должны быть разработаны документы, приведенные в Приложении А (таблица А.1, подпункты 3-17 и таблица А.2, подпункты 3-15) ГОСТ РВ 15.203 [42], при этом разрабатывается программа обеспечения надежности разработки по ГОСТ РВ 27.1.02 [48] и план совместных работ по ГОСТ РВ 15.208 [44].

Результаты эскизного проекта рассматриваются и анализируются на НТС. Представление эскизного проекта для рассмотрения и анализа на НТС осуществляет руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР).

Приемку ЭП осуществляет комиссия, назначенная решением (приказом, распоряжением) заказчика ОКР (СЧ ОКР). По результатам приемки ЭП заказчик выдает заключение по форме 5 ГОСТ РВ 15.203 [42] об утверждении или отклонении проекта в срок не более 30 дней со дня получения материалов ЭП, головной исполнитель ОКР – в срок не более 15 дней со дня получения материалов ЭП, выполняемого исполнителем СЧ ОКР. Действия в случае отклонения проекта регламентированы ГОСТ РВ 15.203 [42].

**Разработка технического проекта.** После рассмотрения и утверждения ЭП приступают к разработке ТП (документам присваивается литера «Т»). Его разрабатывают для выявления окончательных технических решений, дающих полное представление о конструкции изделия, когда это целесообразно сделать до составления рабочей документации. При этом выполняют работы, необходимые для обеспечения предъявляемых к изделию требований, позволяющие оценить

- соответствие требованиям технического задания, определить технологичность, степень сложности изготовления, способы упаковки, возможности транспортировки.

На стадии ТП могут быть изготовлены макеты для проверки основных конструкторских решений по всему изделию и его составным частям и при необходимости вносят соответствующие изменения в конструкцию и чертежи. Необходимость изготовления макетов и их количество устанавливается в ТЗ на работу.

Для опытных образцов изделий ВТ этап разработки технического проекта выполняют в соответствии с требованиями подраздела 5.3 ГОСТ РВ 15.203 [42]. Состав основных работ технического проекта устанавливается в соответствии с Приложением Г ГОСТ РВ 15.203 [42], в объеме согласованном с заказчиком.

При разработке технического проекта выполняют работы, необходимые для обеспечения предъявляемых к образцу требований и позволяющие получать полное представление о конструкции разрабатываемого образца, оценить его соответствие требованиям ТЗ, технологичность, степень сложности изготовления, способы упаковки, возможности транспортирования и монтажа на месте применения, удобство эксплуатации и ремонтпригодность.

- процессе выполнения технического проекта руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) составляет перечень (комплектность) РКД в соответствии с номенклатурой конструкторской документации, приведенной в ГОСТ 2.102 [3], и согласовывает его с представителем заказчика (ПЗ).

Утверждает перечень руководитель организации-исполнителя и головной исполнитель ОКР, если выполняется СЧ ОКР.

Рассмотрение, согласование и утверждение документов ТП осуществляют с учетом требований ГОСТ РВ 2.902 [32].

Результаты технического проекта рассматриваются и анализируются на НТС.

Приемка проектных стадий осуществляет приемочная комиссия заказчика ОКР (СЧ ОКР). На приемочную комиссию разработчик, как правило, предъявляет:

- пояснительную записку с технико-экономическим обоснованием;
- отчет о патентных исследованиях в соответствии с ГОСТ Р 15.011 [34] (если его составление предусмотрено условиями контракта (договора));

- документы, разработанные на проектных стадиях, в соответствии с ГОСТ 2.102 [3] и ГОСТ 3.1102 [21];

- результаты испытаний макетов.

Приемочная комиссия рассматривает и проверяет результаты выполнения работ на соответствие ТЗ, оценивает научно-технический уровень принятых технических

решений и их обоснованность и принимает решение о целесообразности использования достигнутых результатов при разработке РКД.

### **1.5.3 Разработка РКД**

После рассмотрения и утверждения ЭП или ТП разрабатывают РКД на опытный образец. Допускается разработка изделий и при одностадийном проектировании, т.е. сразу разрабатывается рабочая конструкторская документация.

РКД разрабатывается на основании утвержденных документов предшествующих стадий, а при отсутствии проектных стадий - непосредственно на основании ТЗ на ОКР в целом и (или) ТЗ на его отдельные составные части. Сначала разрабатывают документацию, предназначенную для изготовления опытного образца (партии), который подвергают всесторонним испытаниям для выявления конструкторских и технологических дефектов с целью доводки изделия. В процессе разработки документации по выбору и проверке новых технических решений, обеспечивающих достижение основных потребительских свойств продукции, могут быть проведены лабораторные, исследовательские, стендовые и другие испытания, а также доводочные испытания опытных образцов продукции, имитирующие реальные условия эксплуатации. По результатам предварительных испытаний опытного

образца конструкторскую документацию корректируют, документам присваивается литера «О».

Для опытных образцов изделий ВТ этап разработки РКД для изготовления опытного образца выполняют в соответствии с требованиями подраздела 5.4 ГОСТ РВ 15.203 [42].

При разработке рабочего РКД руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) обязан:

- сформировать заказы на приобретение или разработку средств измерений, контрольного и испытательного оборудования для изготовления и испытания изделий, проверки комплектующих изделий и материалов на входном контроле;
- определить перечень материалов и покупных комплектующих изделий, подлежащих входному контролю по ГОСТ 24297 [20];
- разработать и согласовать с ВП программу и методики проведения предварительных испытаний в соответствии с ГОСТ РВ 15.211 [46].

Рабочую конструкторскую документацию разрабатывают в полном соответствии с требованиями ЕСКД, ЕСПД и ЕСТП.

При проработке конструкции изделия используются руководящие указания по конструированию в соответствии с ГОСТ В 15.213 [49]. При этом для обеспечения

качества и надежности разрабатываемых изделий руководитель проекта или СЧ ОКР должен предусмотреть:

а) определение функциональных и конструктивных требований ко всем элементам конструкции разрабатываемого изделия; определение критичных конструктивных элементов (физических структур), технологических операций и их параметров с точки зрения реализации требований ТЗ;

б) применение перспективных базовых конструкций, типовых технологических процессов и оборудования с целью обеспечения высокой технологичности конструкции;

в) проведение анализа опыта проектирования, производства и эксплуатации изделий-аналогов, выделение конструктивно подобных элементов в разрабатываемом изделии, аналогичных структурно-функциональным элементам в изделии -аналог; проведение анализа доминирующих видов и механизмов отказов, выявленных при производстве и эксплуатации изделий-аналогов, и разработку конструктивно-технологических мер по исключению возможности возникновения аналогичных отказов в разрабатываемом изделии;

г) проведение мероприятий по обеспечению и оценке надежности базовых элементов конструкции, используя методы технического расчета и планирования экспериментов, включая следующие работы:

- расчетно-экспериментальную оценку надежности базовых элементов конструкции в условиях и режимах, установленных в ТЗ; при

этом могут быть использованы результаты испытаний и эксплуатации изделий-аналогов, накопленная информационная база проектных норм и критериев, обеспечивающих требуемую надежность;

- оптимизацию уровней нагруженности элементов конструкции;
- создание технически и экономически обоснованных запасов по параметрам и конструктивно-технологическим запасам по электрическим режимам, а также по стойкости к механическим, климатическим и специальным факторам, предусмотренных требованиями ТЗ;

д) определение и учет законов распределения дефектов, присущих исходным материалам и технологическим операциям, для обеспечения малых уровней вероятности присутствия в элементах конструкции потенциально опасных скрытых дефектов;

е) оптимизацию допусков на параметры у критичных с точки зрения надежности конструктивных элементов и изделия в целом на основе результатов, полученных при

проведении вышеперечисленных работ с учетом затрат на их обеспечение, включая сопоставление затрат на реализацию альтернативных вариантов;

ж) выбор (разработка) методов и технически обоснованных показателей точности измерений параметров;

з) определение оптимальных режимов и условий применения изделия для обеспечения максимальной надежности его в эксплуатации и (или) зависимости надежности изделия от режимов и условий применения; и) обеспечение совместимости изделия с предлагаемыми

устройствами (изделиями) в условиях применения; к) обеспечение стыковки изделия узкоцелевого назначения с аппаратурой.

Одним из документов комплекта РКД являются *Технические условия*. Технические условия (ТУ) разрабатывают в соответствии с ГОСТ 2.114 [7] и отраслевыми стандартами на конкретные виды продукции (при их наличии), стандарты предприятий – в соответствии с ГОСТ Р 1.4 [1]. Для несерийной единичной продукции ТУ допускается не разрабатывать.

- этом случае документом, содержащим необходимые требования для разработки, изготовления, приемки и поставки единичной продукции является ТЗ.

Требования, установленные ТУ, не должны противоречить обязательным требованиям государственных (межгосударственных) стандартов, распространяющихся на данную продукцию.

Если отдельные требования установлены в стандартах или других технических документах, распространяющихся на данную продукцию, то в ТУ эти требования не повторяют, а делают ссылки на эти стандарты и документы в соответствии с ГОСТ 2.105 [5]. Обозначение ТУ присваивает разработчик. На изделия машиностроения и приборостроения ТУ обозначают по ГОСТ 2.201 [12].

ТУ должны содержать вводную часть и разделы, расположенные в следующей последовательности:

- технические требования;
- требования безопасности;
- требования охраны окружающей среды;
- правила приемки;
- методы контроля;
- транспортирование и хранение;
- условия эксплуатации;



- гарантии изготовителя.

Состав разделов и их содержание определяет разработчик в соответствии с особенностями продукции.

Вводная часть должна содержать наименование продукции, ее назначение, область применения (при необходимости) и условия эксплуатации.

- разделе «Технические требования» должны быть приведены требования и нормы, определяющие показатели качества и потребительские (эксплуатационные) характеристики продукции.

Раздел в общем случае должен состоять из следующих подразделов: – основные параметры и характеристики (свойства); – требования к сырью, материалам, покупным изделиям; – комплектность; – маркировка; – упаковка.

- разделе «Требования безопасности» указываются условия обеспечивающие безопасность работающих при монтаже (демонтаже) изделий, вводе в эксплуатацию и эксплуатации. По наличию требований безопасности и других обязательных требований к данному виду продукции устанавливается обязательная сертификация на соответствие. Требования безопасности к продукции установлены ГССБТ. В разделе указывают: требования электробезопасности; требования пожарной безопасности; требования взрывобезопасности; требования радиационной безопасности; требования безопасности от воздействия химических и загрязняющих веществ, в том числе предельно допустимые концентрации или входящих в него компонентов; требования безопасности при обслуживании машин и оборудования, в том числе требования при ошибочных действиях обслуживающего персонала и самопроизвольном нарушении функционирования; требования к защитным средствам и мероприятиям обеспечения безопасности, в том числе к устройству ограждений, ограничений хода, блокировок, конечных выключателей подвижных элементов, креплений и фиксаторов подвижных частей, оснащению рабочих мест, органами управления и приборами контроля, аварийной сигнализации, требования к нанесению сигнальных цветов и знаков безопасности.

- разделе «Требования охраны окружающей среды» устанавливают требования для предупреждения вреда окружающей природной среде, здоровью и генетическому фонду человека при испытании, хранении, транспортировке, эксплуатации (применении) и утилизации продукции, опасной в экологическом отношении.

- разделе «Правила приемки» указывают порядок контроля продукции, порядок и условия предъявления и приемки продукции органами технического контроля предприятия-изготовителя и потребителем (заказчиком), размер

предъявляемой партии, сопроводительную документацию, а так же порядок оформления результатов приемки.

- зависимости от характера продукции устанавливают программы испытаний (например, приемо-сдаточных, периодических, типовых, на надежность), а так же указывают порядок использования (хранения) продукции, прошедшей испытания до капитального ремонта и безотказности (средней наработки на отказ).

Для каждой категории испытаний устанавливают периодичность их проведения, количество контролируемых образцов, перечень контролируемых параметров. Чаще всего приемо-сдаточным испытаниям подвергают каждое изделие, периодические испытания проводят не реже одного раза в год. Контрольные испытания на надежность проводят с целью определения долговечности ресурса изделия и безотказности (наработки на отказ).

- разделе «Методы контроля» устанавливают приемы, способы, режимы контроля (испытаний, измерений, анализа) параметров, норм, требований и характеристик продукции.

- разделе «Транспортирование и хранение» устанавливают требования к обеспечению сохранности продукции при ее транспортировке и хранении, в том числе обеспечению безопасности.

Правила хранения продукции излагают в следующей последовательности:

– место хранения; – условия хранения;

– условия складирования;

– специальные правила и сроки хранения (при необходимости). Требования к транспортированию и хранению могут быть приведены

только при отсутствии на данную продукцию стандарта транспортирования и хранения.

- разделе «Указания по эксплуатации» приводят указания по установке, монтажу и применению продукции на месте ее эксплуатации (применения).

Раздел «Гарантии изготовителя» может быть изложен в соответствии с ГОСТ РВ 15.306 [47].

ТУ подлежит согласованию на приемочной комиссии, если решение

- постановке продукции на производство принимает приемочная комиссия. Подписание акта приемки опытного образца (опытной партии) продукции членами комиссии означает согласование ТУ.

ТУ, содержащие требования, относящиеся к компетенции органов государственного контроля и надзора, если они не являются членами приемочной комиссии, подлежат согласованию с ними. Необходимость согласования с потребителем ТУ на продукцию, разработанную в инициативном порядке, определяет разработчик. ТУ утверждает разработчик ТУ. ТУ утверждают, как правило, без ограничения срока действия. Технические условия должны быть внесены в каталожный лист Центрами стандартизации, метрологии и сертификации.

На основе рабочего РКД для изготовления опытного образца разрабатывается и утверждается *технологическая документация* по требованиям, установленным стандартами ЕСТД.

При отработке технологических процессов в целях обеспечения качества (надежности) разрабатываемого изделия руководитель проекта должен предусматривать:

- определение технологических операций, режимов и условий их проведения, в наибольшей степени оказывающих влияние на качество параметров критичных элементов конструкции продукции, а также технологических операций, при выполнении которых возможно появление скрытых дефектов; разработку порядка и методов управления такими технологическими операциями; выбор или разработку методов и критериев контроля по выявлению скрытых дефектов;
- разработку схемы операционного контроля, выбор и разработку методов, критериев и оборудования для контроля, ориентированных на самоконтроль, автоматизацию контроля и статистическую обработку получаемой информации;
- разработку системы статистического регулирования технологических процессов на операциях, в наибольшей степени оказывающих влияние на качество изделий;
- разработку требований к составу и методам входного контроля используемых материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий и т.д., определение необходимости их предварительного опробования в процессе изготовления продукции;
- разработку требований к порядку и условиям межоперационного хранения материалов, полуфабрикатов, деталей, сборок, готовой продукции;
- разработку требований к условиям производства (запыленность окружающей среды, влажность, температура и др.) на важнейших технологических операциях;

- разработку методов анализа и анализ причин возникновения дефектов, выявленных в процессе изготовления и испытаний опытных образцов, а также подконтрольной эксплуатации серийных образцов и отработку требований к технологическому процессу по их исключению;

- определение состава технологического оборудования, средств измерений и испытаний, обеспечивающих необходимую точность и пригодных к условиям промышленного (серийного) производства;

- определение состава, разработку или выбор методов испытаний, применяемых для контроля продукции.

Все изделия ВТ должны подвергаться входному контролю согласно ГОСТ РВ 0015-308 [37]. РКД и ТД подвергается метрологической экспертизе, которая проводится в соответствии ГОСТ РВ 8.573 [31].

- процессе выполнения данного этапа разрабатывают документы, приведенные в Приложении А ГОСТ РВ 15.203 [42]. Комплект РКД, формируется по ГОСТ 2.102 [3] в зависимости от вида и стадии разработки документации. Согласование и утверждение РКД производится в порядке, предусмотренном ГОСТ РВ 15.203 [42] и ГОСТ 2.902 [16].

- настоящее время все более широкое распространение получают электронные конструкторские документы, которые разрабатываются по результатам автоматизированного проектирования и конструирования или преобразования документов, выполненных в бумажной форме, в электронную форму.

Электронные документы могут быть представлены в следующих видах – внутреннее и внешнее. Во внутреннем (подлинном) виде электронный документ существует только в виде записи информации, составляющей электронный документ, на электронном носителе и воспринимаемом только программно-техническими средствами. Все графические документы (чертежи, схемы и пр.) могут быть выполнены в электронной форме как электронные чертежи и (или) как электронные модели изделия (ЭМИ).

*Электронная модель изделия* – электронный конструкторский документ, представляющий набор данных, определяющий геометрию изделия и иные свойства, необходимые для изготовления, контроля, приемки, сборки, эксплуатации, ремонта и утилизации изделия.

ЭМИ применяют:

- для интерпретации всего составляющего модель набора данных (или его части) в автоматизированных системах;

- для визуального отображения конструкции изделия в процессе выполнения проектных и конструкторских работ, производственных и иных операций;
- для изготовления чертежной РКД в электронной и (или) бумажной форме.

Различают следующие виды электронных моделей изделий:

а) электронная модель детали (ЭМД) – электронный конструкторский документ, содержащий геометрическую модель детали и все требования, необходимые для ее изготовления и контроля (включая предельные отклонения размеров, шероховатостей поверхностей, сведения

- др.);

б) электронная модель сборочной единицы (ЭМСЕ) – электронный конструкторский документ, дающий полное представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых в сборочную единицу, и содержащий необходимую и достаточную информацию для осуществления сборки и контроля сборочной единицы;

в) электронный макет (ЭМК) – разновидность ЭМСЕ и предназначен для оценки взаимодействия составных частей макетируемого изделия или изделия в целом с элементами производственного и (или) эксплуатационного окружения.

Общие требования выполнения электронных документов приведены

- ГОСТ 2.051 [17], ГОСТ 2.052 [18] и ГОСТ 2.053 [19].

После утверждения РКД на опытный образец и внесения в нее корректировок по замечаниям ВП, подразделение-разработчик документации комплектно (в пределах сборочных единиц) передает подлинники РКД на хранение. Порядок хранения, учета и обращения РКД и ТД ведется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.501 [14].

Результаты этапа разработки РКД рассматриваются и анализируются на НТС. Представление этапа для рассмотрения и анализа на техническом совещании осуществляет руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР). Основанием для закрытия данного этапа ОКР (СЧ ОКР) служит - согласование (визирование) ВП подлинников согласно утвержденному перечню (комплектности) РКД на изделие ВТ (составной части изделия ВТ).

#### **1.5.4 Испытания опытных образцов изделий (продукции)**

Опытные образцы (партии) изделий (продукции), головные образцы (образцы единичной и мелкосерийной изделий (продукции), как правило, реализуемые заказчику) в соответствии с ГОСТ Р 15.201 [35] подвергают предварительным и приемочным испытаниям. Предварительные испытания проводят с целью предварительной оценки соответствия опытного образца требованиям ТЗ, а также для

определения готовности образца к приемочным испытаниям. Приемочные испытания проводятся в условиях, приближенных к условиям реальной эксплуатации продукции, с целью оценки соответствия характеристик параметрам заданным ТЗ. По результатам испытаний принимается решение об организации промышленного производства продукции. При наличии обязательных требований предъявляемых к продукции, подлежащих обязательному подтверждению соответствия (сертификации ) в приемочных испытаниях участвуют аккредитованные лаборатории (центры), на основании протоколов испытаний органами по сертификации выдается сертификат. Номенклатуру товаров, подлежащих обязательной сертификации, определяет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии РФ (Росстандарт) или другие федеральные органы исполнительной власти в соответствии с законодательными актами Российской Федерации . Предварительные и приемочные испытания проводят в соответствии с программами и методиками испытаний.

Программы испытаний (ПИ) разрабатывают на основе требований ТЗ, РКД с использованием при необходимости типовых программ, типовых (стандартизованных) методик.

- программу испытаний включают: – объект испытаний; – цель испытаний; – объем испытаний;
- условия и порядок проведения испытаний (перечень конкретных проверок);
- метрологическое обеспечение испытаний;
- отчетность по испытаниям.

В методику испытаний включают:

- оцениваемые характеристики (свойства, показатели) продукции;
- условия и порядок проведения испытаний;
- способы обработки, анализа и оценки результатов испытаний;
- используемые средства испытаний, контроля и измерений;
- отчетность.

Методики испытаний, применяемые для определения соответствия продукции обязательным требованиям, если они не являются типовыми стандартизованными методиками, должны быть аттестованы в установленном порядке и согласованы с соответствующими органами государственного надзора.

Программа и методика испытаний должна предусматривать:

– проверку качества рабочей конструкторской и эксплуатационной документации (включая проект ТУ) на пригодность документации в промышленном производстве;

- проверку соответствия изделия чертежам, техническим требованиям, паспортным данным и нормам точности;
- определение показателей качества и надежности изделия;
- проверку обеспечения стабильности работы изделия;
- проверку удобства обслуживания и проведения ремонта изделия;
- проверку соответствия изделия требованиям техники безопасности;
- продолжительность и режим испытаний, а также необходимые замеры во время испытаний;
- схемы и средства контроля и величины предельных отклонений параметров.

Предварительные испытания опытного образца проводят по программе и методике испытаний, разработанной предприятием-разработчиком в соответствии с ТЗ и утвержденной в порядке, установленном у разработчика.

На предварительные испытания предъявляются:

- опытный образец;
- ТЗ;
- комплект РКД.

Комиссия по проведению предварительных испытаний может прекратить их. Основаниями к прекращению испытаний могут быть:

- несоответствие образца требованиям ТЗ;
- повторяющиеся отказы опытного образца, в том числе по разным причинам.

Прекращение испытаний оформляется актом по форме, установленной у разработчика. По результатам предварительных испытаний составляется акт. В акте приводят заключения комиссии по результатам испытаний, о пригодности опытного образца для предъявления на приемочные испытания и рекомендации о присвоении документации литеры «О».

Разработчик на основании замечаний, указанных в акте, разрабатывает, при необходимости, план мероприятий по устранению недостатков, выявленных в процессе испытаний, и утверждает его у руководителя предприятия-разработчика. Разработчик на основании плана мероприятий дорабатывает опытный образец, корректирует РКД.

Разработчик составляет акт о завершении корректировки РКД и доработки опытного образца по форме, установленной на предприятии-разработчике. Утверждение акта является основанием для предъявления опытного образца вместе с РКД на приемочные испытания. Акт о завершении корректировки КД утверждается заказчиком.

Комплекту РКД, откорректированному по результатам предварительных испытаний, присваивается литера «О» в соответствии с ГОСТ 2.103 [4] и в порядке, установленном ГОСТ 2.503 [15]. При этом литеру «О» допускается проставлять только в основной надписи головной спецификации изделия и проекте ТУ. Этот комплект направляется изготовителю (если он известен и если им не является предприятие-разработчик) и предъявляется на приемочные испытания. Допускается по согласованию с заказчиком не вносить изменения (в том числе простановку литеры) в подлинники РКД, до их корректировки по результатам приемочных испытаний.

Приемочные испытания проводят в целях оценки всех определенных ТЗ характеристик продукции, проверки и подтверждения соответствия опытного образца продукции требованиям ТЗ в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации (применения, использования), а также принятия решения о возможности ее промышленного производства (для серийной продукции) или реализации (для несерийной продукции). Место проведения приемочных испытаний указывается в ПМ, согласованной заказчиком.

Приемочные испытания проводит по ГОСТ Р 15.201 [35] (для средств измерений – по ПР 50.2.009 [50]) приемочная комиссия. Приемка результатов работ приемочной комиссией осуществляется в соответствии с установленным порядком. При проведении приемочных испытаний без участия комиссии, ее функции и обязанности возлагаются на комиссию предприятия-разработчика, что должно быть оговорено в контракте (договоре) и (или) в ТЗ на ОКР. В партии продукции приемочным испытаниям, как правило, подвергают головной образец, а остальные экземпляры продукции – приемо-сдаточным испытаниям. По предложению (соглашению) заказчика единичная продукция может быть принята без приемочной комиссии по результатам приемочных испытаний. Допускается по решению комиссии принимать результаты отдельных видов испытаний, полученные при проведении предварительных испытаний, без дополнительной их проверки с указанием соответствующего акта предварительных испытаний.

При проведении приемочных испытаний с участием приемочной комиссии, результаты испытаний приводятся в акте приемочной комиссий.



Корректировка РКД по результатам испытаний проводится по ГОСТ 2.503 [43] после подписания акта приемочной комиссии с присвоением КД литеры "О1" (для серийной продукции и единичной продукции повторяющегося производства).

По окончании приемочных испытаний опытные образцы или образцы опытной партии считаются выполнившими свои функции. Их дальнейшее использование (в качестве единиц несерийной продукции), утилизация или уничтожение определяются особым решением, отвечающим действующему законодательству.

Приемка результатов разработки продукции организуется заказчиком при условии готовности исполнителя к сдаче работ, в соответствии со сроками, установленными календарным планом, прилагаемым к контракту (договору), и оценивается приемочной комиссией, если необходимость комиссионной приемки результатов разработки в целом и отдельных ее этапов, оговаривается в контракте (договоре) и (или) в ТЗ. Организация работы приемочной комиссии проводится в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201 [35]. Работа приемочной комиссии оканчивается составлением акта приемки работ.

- акте приемки работ с учетом этапа принимаемой работы и специфики продукции в общем случае приводятся:

- состав приемочной комиссии, сроки выполнения работы, полное наименование работы, наименование предприятия-исполнителя, наименование и номер договора, наименование проекта;

- рассмотренные приемочной комиссией материалы, (конструкторская документация, протоколы испытаний, расчеты, отчеты, бухгалтерские и организационно-распорядительные документы и др.);

- оценка, данная рассматриваемой работе приемочной комиссией, рекомендации приемочной комиссии;

- рекомендуемые сроки устранения разработчиком замечаний, изложенных в акте.

Акт приемки ОКР составляется в двух экземплярах, подписывается председателем и всеми членами приемочной комиссии и утверждается представителем заказчика. Один экземпляр утвержденного акта заказчик направляет разработчику. Утверждение акта приемки работы означает прекращение действия ТЗ (если оно не распространяется на дальнейшие работы), согласование ТУ и РКД.

После утверждения акта приемки работ разработчик устраняет замечания (при их наличии) в установленные сроки и составляет акт по результатам корректировки РКД. Указанный акт согласовывается с председателем приемочной комиссии.

Акт приемочной комиссии совместно с актом сдачи-приемки НТП направляется заказчику. Утверждение акта сдачи-приемки НТП заказчиком означает окончание работы в целом (или ее этапа) и возможность предъявления заказчику платежного требования.

***Особенности проведения предварительных и государственных (межведомственных) испытаний опытного образца изделия ВТ, утверждения РКД для организации серийного производства изделий.***

Этап изготовления опытного образца и проведения предварительных испытаний выполняют в соответствии с требованиями раздела 5.5 ГОСТ РВ 15.203 [42]. Цель этапа – изготовление опытного образца (опытной партии) для определения его соответствия требованиям ТЗ и возможности предъявления на государственные (межведомственные) испытания. Изготовление и приемка опытного образца (опытной партии) изделия проводится по безлитерной рабочей конструкторской документации. Технологическая подготовка производства для изготовления опытных образцов (партии) изделия осуществляется под руководством начальника производственного участка или подразделения, ответственного за изготовление опытного образца (партии) изделия. Ответственное подразделение за изготовление опытных образцов назначается отдельным приказом руководителя-исполнителя ОКР и указывается в плане-графике выполнения ОКР (СЧ ОКР). Технологическая подготовка производства выполняется в соответствии с правилами и положениями ЕСТПП.

Приемку опытного образца перед предварительными испытаниями осуществляет ВП. Испытания проводят в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 15.210 [45] по утвержденным программам и методикам испытаний согласно ГОСТ РВ 15.211 [46].

Программы и методики выполнения измерений разрабатываются в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.563 [29], с учетом положений ГОСТ РВ 8.570 [30]. Техническую экспертизу опытных образцов разрабатываемых изделий (при необходимости) проводят ГОСТ РВ 0015-215 [38]. Метрологическую экспертизу опытных образцов разрабатываемых изделий проводят по ГОСТ РВ 8.573 [31].

При проведении предварительных испытаний используют аттестованное испытательное оборудование, поверенные средства измерений и проверенное контрольное оборудование. Заключение о соответствии опытных образцов требованиям ТЗ дается в акте предварительных испытаний в соответствии с ГОСТ РВ 15.210 [45].

Если предварительными испытаниями установлены несоответствия характеристик изделий требованиям ТЗ, то руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) проводит анализ

причин несоответствий и оформляют акт причин несоответствий и мероприятий по их устранению. По результатам анализа проводится доработка РКД и опытного образца изделия, после чего образцы подвергаются новым предварительным испытаниям по скорректированной программе. Приемка доработанных РКД и опытного образца осуществляют в соответствии с ГОСТ РВ 15.203 [42].

Результаты этапа изготовления и предварительных испытаний опытных образцов рассматриваются и анализируются на НТС. По результатам работы технического совещания составляется акт, в котором должен быть сделан вывод о готовности опытного образца для проведения государственных или межведомственных испытаний и о присвоении документации литеры «О».

Основанием для закрытия этапа является акт материально-технической приемки в соответствии с ГОСТ РВ 15.203 [42].

Этап проведения государственных (межведомственных) испытаний опытного образца разработанного изделия проводят в соответствии с разделом 5.6 ГОСТ РВ 15.203 [42]. Программу и методики проведения государственных (межведомственных) испытаний готовит руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) по ГОСТ РВ 15.211 [46], если иное не определено ТЗ. Государственные (межведомственные) испытания проводят в соответствии с ГОСТ РВ 15.210 [45].

Если государственными (межведомственными) испытаниями установлено несоответствие характеристик изделий требованиям ТЗ, то руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) организывает доработку комплекта РКД и опытного образца, после чего образцы подвергаются новым государственным (межведомственным) испытаниям по скорректированной программе. Приемка доработанного комплекта РКД и опытного образца осуществляют по регламенту ГОСТ РВ 15.203 [42].

Основанием для закрытия этапа служит утвержденный акт государственных (межведомственных) испытаний, оформленный в соответствии с подразделом 5.6 ГОСТ РВ 15.203 [42].

Этап утверждения РКД для организации серийного производства изделий ВТ проводится в соответствии с подразделом 5.7 ГОСТ РВ 15.203 [42]. Целью этапа является согласование и утверждение РКД и подготовка

- к сдаче-приемке по условиям контракта (договора) для дальнейшей реализации ОКР (СЧ ОКР).

По результатам проведения государственных (межведомственных) испытаний в сроки, оговоренные решением по акту проведения этих испытаний, руководитель проекта ОКР (СЧ ОКР) осуществляет:

- корректировку рабочего РКД и ЭД;

- доработку, при необходимости, опытного образца изделия;
- проверку, согласование и утверждение РКД с присвоением ей литеры «О1»;
- корректировку ТД;
- доработку (корректировку) программных средств;
- регистрацию и передачу программного обеспечения в фонд алгоритмов и программ;
- оформление отчета по ОКР (СЧ ОКР) и другой ОНТД к сдаче-приемке.

ОНТД по ОКР (СЧ ОКР) готовит руководитель проекта или ответственный исполнитель ОКР (СЧ ОКР) в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 15.110 [40].

Утверждение РКД для организации серийного производства разработанного изделия осуществляет межведомственная комиссия, назначенная распоряжением генерального заказчика, если иное не оговорено ТЗ на ОКР (СЧ ОКР).

Работа межведомственной комиссии осуществляется по регламенту ГОСТ РВ 2.902 [52]. По результатам работы межведомственной комиссии составляется акт, являющийся основанием для закрытия данного этапа работ и приемки ОКР (СЧ ОКР) в целом.

### **1.5.5 Подготовка и освоение производства (постановка на производство) продукции**

*Подготовка производства* . Подготовку и освоение производства, которые представляют собой этапы постановки продукции на производство , осуществляют с целью обеспечения готовности производства к изготовлению и выпуску (поставке) вновь разработанной (модернизированной) либо, выпускавшейся ранее другим предприятием продукции в заданном объеме, соответствующей требованиям конструкторской документации.

- моменту постановки продукции на производство результаты приемочных испытаний должны быть признаны органами государственного надзора.

Изготовитель принимает от разработчика продукции: – комплект РКД и ТД литеры О1 или более высокой; – специальные средства контроля и испытаний; – опытный образец продукции (при необходимости);

– документы согласования применения комплектующих изделий; – заключения по приведенным экспертизам (в том числе метрологической, экологической и др.); – копию акта приемочных испытаний;

– документы, подтверждающие соответствие разработанной продукции обязательным требованиям.

На этапе подготовки производства должны быть выполнены работы, обеспечивающие технологическую готовность предприятия к изготовлению продукции в заданных объемах, а также следующие основные работы:

- разработка ТД;
- отработка конструкции на технологичность с учетом стандартов ЕСТД;
- заключение договоров (контрактов) с поставщиками комплектующих изделий и материалов и лицензионных соглашений с правообладателем на использование объектов промышленной и интеллектуальной собственности;
- подготовка и представление в органы Росстандарта каталожного листа продукции в установленном порядке.

Подготовку производства считают законченной, когда изготовителем продукции получена вся необходимая документация, разработана (отработана) ТД на изготовление продукции, опробованы и отлажены средства технологического оснащения и технологические процессы, подготовлен персонал, занятый при изготовлении, испытаниях и контроле продукции, и установлена готовность к освоению производства. **Освоение производства.** На этапе освоения производства изготавливается установочная серия (первая промышленная партия), дорабатывается технологический процесс производства продукции, проводятся квалификационные испытания, дорабатывается изделие на технологичность, утверждается РКД и ТД с присвоением литеры «А».

- период постановки на производство продукции изготовитель проводит все необходимые работы для последующей обязательной по законодательству сертификации продукции.

С целью демонстрации готовности предприятия к выпуску продукции, проверки разработанного технологического процесса, обеспечивающего стабильность характеристик продукции, а так же для оценки готовности предприятия к выпуску продукции, проводят квалификационные испытания. Программа испытаний разрабатывается изготовителем с участием разработчика.

- программе указывают:
- количество образцов в установочной серии;
- все виды периодических испытаний, указанных в ТУ, а также другие виды испытаний, позволяющие достигнуть цели квалификационных испытаний;
- место проведения испытаний.

Квалификационные испытания проводит комиссия, в состав которой входят представители изготовителя, разработчика продукции, разработчиков и поставщиков комплектующих изделий и, при необходимости, органов государственного надзора и других заинтересованных сторон. Проведение испытаний оформляют протоколами испытаний.

Результаты квалификационных испытаний считают положительными, если установочная серия выдержала испытания по всем пунктам программы, положительно оценена технологическая оснащенность производства и стабильность технологического процесса.

Положительные результаты оформляют актом, в котором указывают:

- соответствие продукции обязательным требованиям и КД, результаты выборочного контроля технологического процесса;
- рекомендации об установлении эталонов для установившегося промышленного производства (при необходимости);
- оценку готовности изготовителя к производству и готовности к утверждению КД и ТД с присвоением литеры «А».

При положительных результатах квалификационных испытаний освоение производства считается законченным.

В последние годы одним из важнейших источников НТИ является глобальная сеть Интернет (Internet) с сервисами (поисковиками), предназначенными для поиска необходимой информации в сети. В базе данных поисковых систем сети Интернет находится информация, которая постоянно обновляется автоматизированными системами. На сегодняшний день следует выделить следующие поисковые системы, обладающие своими алгоритмами поиска и информационными базами, которые пользуются наибольшей популярностью в России и за рубежом: Google, Yahoo, MSN Search, Яндекс и др. Ниже приведен список некоторых поисковых систем в области НТИ: <http://www.scirp.org/Index.aspx> – известные научно-технологические журналы по различным отраслям знаний;

<http://jurn.org/> – академический поисковик, индексирующий бесплатные журналы и веб-ресурсы по гуманитарным наукам, включая психологию, лингвистику, социологию, экономику и т.п.

<http://academic.research.microsoft.com/> – поисковик по всем основным направлениям науки, исследований и инженерно-технологических разработок научным публикациям с набором дополнительных сервисов

<http://academic.research.microsoft.com/> – российская научно-информационная сеть, включающая платформу для публикаций по всем отраслям науки;

<http://www.globalspec.com/> – инженерный поисковик по продуктам, изделиям, техническим решениям, деталям, расчетам и названиям компаний;

<http://www.thefreelibrary.com/> – общедоступная база книг и статей по всем направлениям науки, техники и бизнеса с 1995 года до сегодняшнего дня;

<http://worldwidescience.org/> – мультипортал для поиска по ведущим мировым научно-техническим базам (переводится на 10 основных языков Интернета, включая русский);

<http://www.techcast.org/default.aspx> – платформа для прогнозирования и отслеживания тенденций в различных отраслях техники и технологий;

<https://socionet.ru/> – российская онлайн-научная инфраструктура, содержащая архивы диссертаций, статей, материалы конференций по информационно-компьютерным, гуманитарным, естественным наукам и экономике;

<http://www.scirus.com/> – наиболее полный инструмент для поиска научных исследований в интернете;

<https://scholar.google.ru/> – научный Google, со всеми его гигантскими достоинствами и определенными маркетинговыми особенностями.

<http://www.scienceresearch.com/scienceresearch/> – поисковик по научной и технологической информации, обладающий авторитетными и обширными научно-техническими и технологическими материалами, которые включают в себя архивы, сервера, базы данных, не доступные для популярных поисковых систем;

<http://www.scholar.ru/> – российский поисковик научных публикаций, авторефератов и диссертаций по всем областям науки;

<http://elibrary.ru/> – электронная научная библиотека российских и зарубежных журналов по всем отраслям науки и техники;

<http://www.science.gov/> – поисковик, который содержит результаты исследований и разработок, финансирующихся правительством США;

<http://hcr.stateofinnovation.thomsonreuters.com/> – поисковик Thomson Reuters, позволяющий найти конкретных исследователей и разработчиков по отраслям науки, темам, учреждениям и странам;

<http://www.techxtra.ac.uk/> – библиотека статей, сайтов, книг и диссертаций по всем основным отраслям науки и техники;

<http://www.scinet.cc/> – поисковик по основным направлениям науки и технологий;

<http://www.socsciresearch.com/> – поисковик по исследованиям и разработкам в области социальных наук.



## **3.2 Правовое, нормативно-методическое и метрологическое обеспечение НИОКР**

### **3.2.1 Нормативно-правовое регулирование деятельности в области НИОКР**

Правовое обеспечение НИОКР основано на законодательных и нормативных актах по различным вопросам деятельности, направленной на получение новых знаний и их практическое применение при создании нового изделия или технологии, принятых на федеральном (государственном) и региональном уровне. К данным законодательным и нормативным актам следует относить действующие федеральные законы, постановления правительства и федеральных органов управления, государственные стандарты. В целом решение задач, стоящих перед законодательством в области НИОКР, должно быть направлено на обеспечение:

- развития фундаментальной науки, важнейших прикладных исследований и разработок;
- устойчивого финансирования, поддержания и развития научно-исследовательской и опытно-экспериментальной базы, обновления основных производственных фондов, сохранности и нормальных условий эксплуатации действующей стендовой, метрологической и производственной базы;
- повышения эффективности использования результатов научной и научно-технической деятельности;
- правовой охраны и защиты РИД;
- создания, сохранения и развития кадрового потенциала, повышения престижа научной и научно-технической деятельности;
- регулирования сферы международного научного, научно-технического и технологического сотрудничества, стимулирования создания международных научных организаций, научно-производственных структур, поддержки продвижения на мировой рынок отечественной научной и научно-технической продукции.

Нормативно-методическое обеспечение НИОКР основано на совокупности документов организационного, организационно-методического, организационно-распорядительного, технического, нормативно-технического, технико-экономического и экономического характера, а также нормативно-справочных материалах, устанавливающих нормы, правила, требования, характеристики, методы, методики и другие данные, используемые при решении задач планирования и управления НИОКР. Основные положения нормативных правовых актов содержат определения и содержание основных понятий в научно-технической сфере, определяют объекты и субъекты научной и научно-технической деятельности, организационные, правовые, социальные и экономические аспекты деятельности в области НИОКР.

Нормативно-правовое регулирование деятельности в области НИОКР в России осуществляется на базе Конституции РФ, Гражданского кодекса РФ, Налогового кодекса РФ, принимаемых в соответствии с ними законов и иных нормативных правовых актов РФ и субъектов РФ.

- основным нормативным актам, регламентирующим отношения и принципы развития инновационной деятельности в Российской Федерации
- Федеральный закон от 23 августа 1996 года «О науке и государственной научно-технической политике» №127-ФЗ (с изменениями от 2 июля 2013 года);
- Федеральный закон от 29 декабря 2012 года «Об образовании в Российской Федерации» №273-ФЗ;
- Федеральный закон от 29 декабря 2012 года «О государственном оборонном заказе» №275-ФЗ (с изменениями от 28.12.2013);
- Федеральный закон от 05 апреля 2013 года «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» №44-ФЗ (с изменениями от 28 декабря 2013 года);
- Федеральный закон от 27 декабря 2002 года «О техническом регулировании» №184-ФЗ (с изменениями от 22 декабря 2014 года);

- Положение по бухгалтерскому учету «Учет расходов на научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы» ПБУ 17/02, утвержденное Приказом Минфина РФ от 19 ноября 2002 года №115н.

Например, глава 38 Гражданского кодекса РФ «Выполнение научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских и технологических работ» регулирует особенности работ (п. 1 ст. 769):

- научно-исследовательские работы – исполнитель обязуется провести обусловленные техническим заданием заказчика научные исследования;
- опытно-конструкторские работы – исполнитель обязуется разработать образец нового изделия, конструкторскую документацию на него;
- технологические работы – исполнитель обязуется разработать новую технологию.

При этом научные исследования исполнитель обязан провести лично. Он вправе привлекать к исполнению договора на выполнение НИР третьих лиц только с согласия заказчика (п. 1 ст. 770 Гражданского кодекса РФ), а при выполнении ОКР или ОТР исполнитель вправе, если иное не предусмотрено договором, привлекать к его исполнению третьих лиц (п. 2 ст. 770 Гражданского кодекса РФ). ст. 773 Гражданского кодекса РФ определены следующие обязанности исполнителя в договорах на выполнение НИР, ОКР и ОТР:

- выполнить работы в соответствии с согласованным с заказчиком ТЗ и передать заказчику результаты в предусмотренный договором срок;
- согласовать с заказчиком необходимость использования охраняемых РИД, принадлежащих третьим лицам, и приобретение прав на их использование;
- своими силами и за свой счет устранять допущенные по его вине
- выполненных работах недостатки, которые могут повлечь отступления от технико-экономических параметров, предусмотренных в ТЗ или в договоре;
- незамедлительно информировать заказчика об обнаруженной невозможности получить ожидаемые результаты или о нецелесообразности продолжения работы;
- гарантировать заказчику передачу полученных по договору результатов, не нарушающих исключительных прав других лиц.

Ст. 774 Гражданского кодекса РФ определяет следующие обязанности заказчика:

- заказчик в договорах на выполнение НИР, ОКР и ОТР обязан:

- передавать исполнителю необходимую для выполнения работы информацию;
- принять результаты выполненных работ и оплатить их;
- договором может быть также предусмотрена обязанность заказчика выдать исполнителю ТЗ и согласовать с ним программу (технико-экономические параметры) или тематику работ.

Налоговым кодексом РФ регулируется налоговый учет расходов на НИОКР, в том числе состав этих расходов, порядок формирования резерва предстоящих расходов, особенности ведения учета расходов по налогу на прибыль, льгот по налогу на добавленную стоимость.

Федеральным законом от 23 августа 1996 года «О науке и государственной научно-технической политике» №127-ФЗ регулируются отношения между субъектами научной и (или) научно-технической деятельности и потребителями научной и (или) научно-технической продукции (работ, услуг), в нем определен порядок формирования и реализации государственной научно-технической политики, основными целями которой являются развитие, рациональное размещение и эффективное использование научно-технического потенциала, увеличение вклада науки и техники в развитие экономики РФ и др. В законе также определены полномочия органов государственной власти РФ и органов государственной власти субъектов РФ в области формирования и реализации научно-технической политики, порядок организации и проведения экспертиз научной и научно-технической деятельности, порядок финансирования и другие вопросы, касающиеся государственной научно-технической политики.

Достаточно полно основные вопросы правового регулирования, бухгалтерского и налогового учета в области НИОКР представлены в [58]

Большое значение в повышении эффективности НИОКР имеют Федеральный закон РФ «О стандартизации», Федеральный закон РФ «О сертификации продукции и услуг» и др., направленные на обеспечение качества и сертификации продукции, в том числе:

- безопасности продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- технической и информационной совместимости и взаимозаменяемости продукции;
- качества продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии;
- экономии всех видов ресурсов;

- безопасности хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций;
- обороноспособности и мобилизационной готовности страны;
- создания условий для деятельности хозяйствующих субъектов различных форм собственности на едином товарном рынке России, а также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле;
- содействия потребителям в компетентном выборе продукции. Одним из направлений правового обеспечения является защита

интеллектуальной собственности, под которой понимается совокупность авторских и других прав на результаты этой деятельности, охраняемые законодательными актами государства. (Постановление Правительства РФ от 12 апреля 2013 года №327 «О единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения»).

Ключевую роль в регулировании и развитии процессов планирования и управления НИОКР играют стратегические документы:

- Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2020 года и дальнейшую перспективу, утвержденные Президентом Российской Федерации от 11 января 2012 г. №Пр-83;
- Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 года №599 «О мерах по реализации государственной политики в области образования
- науки»; Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 17 ноября 2008 года №1662-р;
- Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2011 г. №2227-р;
- Прогноз научно-технического развития Российской Федерации на период до 2030 г., утвержденный решением Правительства РФ от 3 января 2014 г. №ДМ-П8-5;
- Государственная программа Российской Федерации «Развитие науки и технологий на 2013-2020 г.», утвержденная Постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. №301;

- Государственная программа РФ «Экономическое развитие и инновационная экономика», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 21 декабря 2013 г. №2492-р;
- Государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», утвержденная постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. №328;
- Комплекс мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принципы наилучших доступных технологий и внедрение современных технологий, утвержденный распоряжением Правительства РФ от 19 марта 2014 г. №398-р.

Современное законодательство России включает большое число разрозненных нормативных актов, подчас, противоречащих друг другу. В такой ситуации рано или поздно возникает острая потребность в упорядочении действующей правовой системы, обработке законов, сведении их в единое целое. Одним из способов решения таких проблем является систематизация законодательства, которая предоставляет специалисту возможность оперативно находить и точно истолковывать необходимые нормы права, а законодателю, в частности, – стать основой для выработки единой правовой концепции, правового механизма, регулирующего деятельность в области НИОКР.

### **3.2.2 Требования к метрологическому обеспечению НИОКР**

Под метрологическим обеспечением (МО) НИОКР следует понимать установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, направленных на повышение эффективности НИР и ОКР, экспериментов и испытаний. Нормативно-правовой основой метрологического обеспечения точности измерений являются:

- Федеральный закон от 26 июня 2008 года «Об обеспечении единства измерений» №102-ФЗ (с изменениями на 1 января 2015года);
- Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. «О техническом регулировании» №184-ФЗ (с изменениями от 22 декабря 2014 года);
- Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные нормативные документы ГСИ – государственные стандарты.

Требования к МО предусматривают:

- установление метрологических требований, правил и норм при проведении НИОКР;

- обеспечение НИОКР необходимыми методами и средствами измерений (СИ), контроля, испытаний, средствами и методами поверки (калибровки) СИ.

Требования к МО разработки новых (или модернизируемых) изделий (процессов), устанавливаемые в нормативно-технической, проектной, конструкторской и технологической документации должны:

- обеспечивать безопасность продукции (процесса) и нулевой (или минимально допустимый) уровень дефектности изделий и готовой продукции;

- обеспечивать при разработке и приемке новых изделий требуемые метрологические характеристики применяемых для этих целей методов и средств измерений, контроля и испытаний;

- обеспечивать разработки новых изделий необходимыми специальными средствами измерений, дополнительно разработанными;

- содержать необходимые метрологические требования (к точности

- достоверности) к методам и средствам измерений, измерений, контроля, испытаний для продукции, поставляемой предприятиями-смежниками;

- обеспечивать возможность обеспечения калибровкой и ремонтом применяемых средств измерений, контроля, испытаний;

- обеспечивать возможность подготовки организаций или отдельных лабораторий к аккредитации и при необходимости проведения испытаний для целей сертификации.

Объектами анализа состояния измерений, контроля, испытаний являются:

- планы проведения НИОКР;

- технические задания на НИР и ОКР;

- методики экспериментов;

- методики (методы) измерений, контроля и испытаний;

- методики обработки результатов измерений, контроля и испытаний;

- данные о характеристиках процессов, полей, а также используемых веществ и материалов, явлений;

- методы и средства измерений, применяемые для контроля параметров разрабатываемых технологических процессов и продукции, а также контроля факторов безопасности экспериментов и испытаний;
- общее состояние средств измерений, контроля, испытаний в организации, помещений и степень их соответствия метрологическим нормам, требованиям методик выполнения измерений, контроля, испытаний;
- эффективность использования имеющихся средств измерений, контроля, испытаний;
- обеспеченность применяемых СИ поверкой (калибровкой);
- укомплектованность квалифицированными кадрами для проведения измерений, контроля и испытаний в процессе экспериментов;
- состояние и организация деятельности метрологической службы
- части МО НИОКР, в том числе при проведении метрологической экспертизы документов.

Решение задач эффективной организации процессов МО, связанных с получением измерительной информации на всех этапах НИОКР при разработке новых образцов продукции, приобретает все большее значение

- является одним из важнейших факторов повышения ее качества. Разработка и внедрение системных методов управления качеством продукции привели к необходимости формирования, как новых подсистем управления, так и новых задач в таких направлениях деятельности, как, например:

- внедрение новых СИ;
- поиск конструкторских и технологических решений, повышающих контролепригодность продукции и управляемость процессов ее создания и эксплуатации;
- разработка методов установления структурных и количественных взаимосвязей областей измерения значений параметров продукции по фазам технологических циклов стадий ее существования;
- внедрение подсистем управления запасами и подменным фондом средств измерений, рациональных подсистем метрологического обслуживания и ремонта средств измерений.
- таким задачам можно отнести:



- выбор предпочтительных вариантов конструкции изделий и технологических процессов с учетом их метрологического обеспечения;
- анализ и оценку метрологической обеспеченности производства;
- проектирование и создание метрологически обеспеченных технологических комплексов, систем управления и контроля.

Выполнение перечисленных требований вызывает радикальное изменение МО, формирование функционального ядра метрологической деятельности, интеграцию традиционных и новых задач в функциональную подсистему, введение в нее задач организационного и технико-методического управления МО, определение функциональных, информационных и организационных связей подсистемы с другими функциональными подсистемами, обоснованное распределение задач подсистемы между структурными подразделениями.

Для научно обоснованного подхода к построению подсистемы метрологического обеспечения и ее функциональной структуры следует выделить основные направления деятельности по МО:

- внедрение стандартов ГСИ;
- установление оптимальной номенклатуры измеряемых параметров и норм точности измерений, повышающих достоверность входного и приемочного контроля, режимов технологических процессов, оборудования и инструментов;
- обеспечение процессов разработки, производства, испытаний и технического обслуживания изделий методами и средствами выполнения измерений, гарантирующими необходимую точность, а также средствами обработки и представления информации о результатах измерений;
- организация и проведение своевременного метрологического контроля и экспертизы НТД, РКД и ТД;
- подготовка персонала к выполнению метрологических работ;
- разработка и внедрение рациональных организационно-технических форм и методов метрологического обслуживания (поверки) средств измерений и контроля;
- контроль соблюдения методик (методов) измерений, установленных в НТД.

### **3.3 Информационное обеспечение НИОКР**

#### **3.3.1 Общие вопросы информационного обеспечения НИОКР**

Информационное обеспечение НИОКР – это, прежде всего, информация, которая необходима для управления процессами НИОКР. От уровня организации сбора, обработки и передачи информации зависит эффективность управления НИОКР.

Информация, циркулирующая в системе НИОКР, характеризуется сложностью и многообразием и выступает в качестве:

- непосредственного продукта интеллектуальной деятельности;
- один из видов ресурсов;
- информационных потоков, пронизывающих все стадии

НИОКР. Информационные потоки играют важную роль в логистическом подходе к управлению процессами создания новой техники, предполагающим оптимизацию процессов управления прохождением всех видов ресурсов, участвующих в процедурах проведения НИОКР. Отличительной чертой информации в данном случае является ее непрерывное совершенствование, как на качественном, так и количественном уровнях. При этом управленческая информация включает

- себя следующие особенности:
- исходная информация подлежит многократной обработке;
- большие объемы информации должны обрабатываться в течение заданного времени;
- исходные данные и результаты работы должны храниться более продолжительное время, чем промежуточные результаты.

Реализация данных требований на сегодняшний день невозможна без внедрения передовых компьютерных и информационных технологий. Унификация процессов хранения и интеграции данных, удобный поиск, своевременное обновление, интерактивный режим работы специалистов, которые обрабатывают и вводят в банк данных информацию, и специалистов, которые являются ее потребителями, является критически важным требованием в области разработки прогнозирующей аналитики. Информация всегда подлежит обновлению в соответствии с технологическим процессом, а также с учетом требований ее потребителей, которые должны решать комплекс информационно взаимосвязанных управленческих задач. Процессы мониторинга, планирования и контроля выполнения проектов позволяют отслеживать результаты исследований и разработок по итогам прохождения контрольных точек на различных стадиях НИОКР, а также определять соответствие установленным срокам и выделенным ресурсам.

При организации НИОКР особое внимание стоит уделять процессам коммуникации и совместной работы различных групп – участников научно-исследовательской деятельности. Для организации совместной работы и коммуникационных процессов, которые включают обмен сообщениями и файлами, проведение теле- и видеоконференций, вебинаров, использование современных информационных технологий обеспечивает связь между командами НИОКР. Существенным образом на результаты исследований и разработок влияет использование следующих методов:

- комплексного информационного моделирования сложных природных процессов и явлений;
- искусственного интеллекта, позволяющих находить решения плохо формализуемых задач, а также задач с неполной информацией и нечеткими исходными данными;
- когнитивной компьютерной графики, позволяющей в пространственной форме представлять на экране компьютера различные математические формулы и соотношения, и т.д.

Сегодня информационные решения активно используются практически во всех секторах экономики и обеспечивают работу различных функций современного научно-исследовательского предприятия. Организация НИОКР включает в себя множество составляющих, начиная от научно-исследовательской стратегии, заканчивая оценкой результатов исследований и управления кадрами, поэтому новые решения в области информационных технологий должны способствовать оптимизации управления НИОКР.

### **3.3.2 Информационная поддержка научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности**

Информационная поддержка научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности состоит:

- в создании и обновлении банков данных научно-технических программ и проектов, а также РНТД и РИД;
- в поиске и отборе перспективных проектов и предложений по производству наукоемкой продукции для физических и юридических лиц, которые заинтересованы в их финансировании;
- в реализации телекоммуникационной связи с базами данных удаленных информационных центров, включая зарубежные.

При этом информационная поддержка должна обеспечить:

- возможность накопления сведений о научно-технических разработках и РНТД;
- получение доступа к различным источникам информационных ресурсов;
- взаимодействие исполнителей на всех этапах их деятельности;
- выполнение «интеллектуальных» функций.

Состав необходимой для исполнителей НИОКР информации определяется следующими группами факторов, влияющих на решение ими задач:

- типам задач. В составе задач могут быть многократно и однократно решаемые задачи;

- характером задач, которые могут носить как рутинный, так специфический характер. К рутинным задачам, обычно, относят процедуры принятия решений, в том числе определение перечня условий и состава параметров, которые необходимы для принятия тех или иных решений. Для обеспечения решения данных задач могут формироваться и поддерживаться соответствующие базы данных и «прецедентов, создаваться алгоритмы и программные комплексы, формализующие процедуры получения необходимых данных. При решении специфических задач используются специальные методы.

- методами решения задач. У каждого исполнителя НИОКР имеется определенный набор доступных ему методов решения соответствующих задач, на момент подготовки решений, который определяется:

- существованием готовых к применению на практике методик решения задач;
- характеристиками, имеющихся у него программных продуктов и технических средств, которые позволяют осуществить существующие методики решения задач;

- уровнем его квалификации;

- временем, затраченным для получения решения данных задач;

- требуемым качеством получаемых решений;

- возможностями исполнителя НИОКР разрабатывать и поддерживать необходимые специальные базы данных. При создании отдельными исполнителями таких баз данных, система информационной поддержки может выполнять либо функции пополнения этих баз, на основе предоставления находящейся в ней информации, либо функции доступа к другим информационным системам.

Таким образом, различным исполнителям НИОКР нужны сведения, которые имеются в разных базах данных:

- для стадии фундаментальных исследований:
  - о направлениях фундаментальных исследований, которые направлены на получение новых знаний, и которые, впоследствии, могут быть положены в основу прикладных разработок в определенных областях;
  - о РИД, полученных в процессе фундаментальных исследований по конкретным направлениям;
- для стадии прикладных исследований и разработок:
  - о направлениях прикладных и поисковых исследований, которые направлены на определение полученных РИД;
  - о разработках по превращению результатов прикладных научных исследований в модели или экспериментальные образцы;
  - о степени защищенности осуществляемых исследований и разработок;
- для стадии опытно-конструкторских работ:
  - о применяемых схемно-компоновочных, конструктивных и технологических решениях;
  - о материалах, деталях, узлах и сборочных единицах, использующихся при производстве и применении новых изделий;
  - о технологических условиях, которыми должны обладать новые изделия или технологии;
  - о степени защищенности имеющихся конструктивных и технологических решений и их правообладателях др.

Для осуществления взаимодействия научно-исследовательской и информационно-технической функций в большинстве организаций, осуществляющих научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую деятельность, существует отдел информационных технологий, который занимается внедрением новых систем и оказанием ее информационной технической поддержки. В области НИОКР ИТ-специалисты определяют информационно-технологические стратегии, выбирают наиболее оптимальные решения и системы для их внедрения, исходя из технической готовности организации, с целью повышения результативности деятельности научно-исследовательских отделов. При

правильно выстроенной стратегии взаимодействия ИТ и НИОКР отделов на предприятии обеспечивается своевременный выход инноваций, что, в свою очередь, приводит к более высокой окупаемости инвестиций. Кроме того,

- связи с быстрым развитием ИТ-технологий и распространением электронной информации возросла потребность в обеспечении безопасности данных и защите прав различных сторон, участвующих в инновационных процессах. Традиционный подход к обеспечению ИТ-безопасности предполагает создание цифровой среды внутри организации, которая предотвращает различные внешние интервенции, направленные на подрыв социально-экономических интересов организации, включая потерю конкурентных преимуществ, ущерб репутации, финансовые убытки, связанные с раскрытием конфиденциальной информации и др., и ограничивает потоки информации и обмен данными.

Однако степень эффективности взаимодействия отделов информационных технологий и подразделений НИОКР на каждом предприятии имеет разный уровень. В организациях, которые достигли максимальной интеграции информационных технологий в научно-исследовательскую деятельность, часто используют термин «синергия», говоря о взаимосвязи функций ИТ и НИОКР, совместная деятельность которых позволяет выполнять проекты точно в сроки, эффективно управлять инвестициями и повышать результативность всего инновационного предприятия [59, 60]. В целом, развитие информационных технологий включает в себя построение ИТ-инфраструктуры, внедрение нового программного обеспечения, осуществление технической поддержки, сопровождение систем, обучение сотрудников. Важной составляющей в процессах проведения НИОКР является доступность ресурсов, поэтому системы информационной поддержки помогают отслеживать занятость научно-технического персонала и выявлять возможности перераспределения ресурсов в соответствии с приоритетностью проектов, и тем самым способствуют ускорению процессов производства инноваций и сокращению проектных циклов.

Информационные технологии развиваются стремительными темпами, и на смену решениям, которые были уникальными несколько лет назад, приходят усовершенствованные или же абсолютно новые технологии:

- «Интернета вещей» (массовое распространение «умных» машин, зданий, домов, промышленного оборудования, переносной электроники, подключенных к сети Интернет);
- когнитивные системы (системы для наблюдения, обучения, анализа данных, создания идей);
- робототехника (создание роботов и нано-роботов, дронов, самоуправляемых машин) и трехмерная печать (материализация цифровых моделей и создание прототипов);

- решения для обеспечения безопасности (шифрование облачных данных, применение биометрической аутентификации на мобильных устройствах и др.).

Доступ к данным с различных мобильных портативных устройств стал нормой в современном мире. Сегодня мобильные устройства используются не только для потребления данных, но и для создания информации, и становятся важными инструментами для связи научно-исследовательских групп.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- ГОСТ Р 1.4-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения.
- ГОСТ РВ 1.1-96 Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения.
- ГОСТ 2.102-2013 Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов.
- ГОСТ 2.103-68 Единая система конструкторской документации. Стадии разработки.
- ГОСТ 2.105-95 Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.
- ГОСТ 2.106-96 Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.
- ГОСТ 2.114-95 Единая система конструкторской документации. Технические условия.
- ГОСТ 2.118-73 Единая система конструкторской документации.. Техническое предложение.
- ГОСТ 2.119-73 Единая система конструкторской документации.. Эскизный проект.
- ГОСТ 2.120-73 Единая система конструкторской документации.. Технический проект.
- ГОСТ 2.125-2008 Единая система конструкторской

документации. Правила выполнения эскизных конструкторских документов. Общие положения.

- ГОСТ 2.201-80 Единая система конструкторской документации. Обозначение изделий и конструкторских документов.
- ГОСТ 2.301-68 Единая система конструкторской документации. Форматы.
- ГОСТ 2.501-2013 Единая система конструкторской документации. Правила учета и хранения.
- ГОСТ 2.503-2013 Единая система конструкторской документации. Правила внесения изменений.
- ГОСТ 2.902-2005 Единая система конструкторской документации. Порядок проверки, согласования и утверждения конструкторской документации.
- ГОСТ 2.051-2013 Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения.
- ГОСТ 2.052-2006 Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения.
- ГОСТ 2.053-2013 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная структура изделия. Общие положения.
- ГОСТ 24297-2013 Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля.
- ГОСТ 3.1102 -2011 Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов. Общие положения.
- ГОСТ 34.602-89 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы.
- ГОСТ 7.9-95 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования.
- ГОСТ 7.11-2004 (ИСО 832:1994) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на иностранных европейских языках.



- ГОСТ 7.32-2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
- ГОСТ Р 7.0.5-2008 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.
- ГОСТ Р 7.0.12-2011 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на русском языке. Общие требования и правила.
- ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.ГОСТ Р 8.563-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений.
- ГОСТ РВ 8.570-98 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение испытаний вооружения и военной техники. Основные положения.
- ГОСТ РВ 8.573-2000 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза образцов вооружения и военной техники. Организация и порядок проведения.
- ГОСТ 15.000-94 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения.
- ГОСТ 15.101-98 Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ.
- ГОСТ Р 15.011-96 Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения.
- ГОСТ Р 15.201-2000 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство.
- ГОСТ РВ 0015-101-2010 Система разработки и постановки продукции. Военная техника. Тактико-техническое (техническое) задание на выполнение научно-исследовательских работ.

- ГОСТ РВ 0015-308-2011 Система разработки и постановки продукции на производство военной техники. Входной контроль изделий. Основные положения.
- ГОСТ РВ 0015-215-2010 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Организация и порядок проведения технической экспертизы в процессе разработки изделий.
- ГОСТ РВ 15.105-2001 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения научно-исследовательских работ и их составных частей. Основные положения.
- ГОСТ РВ 15.110-2003 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Документация отчетная научно-техническая на научно-исследовательские работы, аванпроекты и опытно-конструкторские работы.  
Основные положения.
- ГОСТ РВ 15.201-2003 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Тактико-техническое (техническое) задание на выполнение опытно-конструкторских работ.
- ГОСТ РВ 15.203-2001 Система разработки и постановки продукции. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. Основные положения.
- ГОСТ РВ 15.207-2005 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок проведения работ по стандартизации и унификации в процессе разработки и постановки на производство изделий. Основные положения.
- ГОСТ РВ 15.208-2005 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Единый сквозной план создания образца (системы, комплекса) и его (их) составных частей. Основные положения.
- ГОСТ РВ 15.210-2001 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Испытания опытных образцов изделий и опытных ремонтных образцов изделий. Основные положения.
- ГОСТ РВ 15.211-2002 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок разработки программ и методик испытаний опытных образцов изделий. Основные положения.
- ГОСТ РВ 15.306-2003 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Обязательства гарантийные.

- ГОСТ РВ 27.1.02-2005 Надежность военной техники. Программа обеспечения надежности. Общие требования.
- ГОСТ В 15.213-89 Система разработки и постановки на производство военной техники. Руководящие указания по конструированию. Основные положения.
- ПР 50.2.009 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений.