

**А.М. ГОЛИКОВ**

**СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ И СЕТИ  
ТЕЛERAДИОВЕЩАНИЯ**

**Учебное пособие**

для специалитета: 10.05.02 Информационная  
безопасность телекоммуникационных систем  
Курс лекций, компьютерный практикум,  
задание на самостоятельную работу

**Томск 2018**

Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования

**Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники**

**А.М. ГОЛИКОВ**

**СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ И СЕТИ ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ**

**Учебное пособие**

для специалитета: 10.05.02 Информационная безопасность  
телекоммуникационных систем

Курс лекций, компьютерный практикум,  
задание на самостоятельную работу

**Томск 2018**

УДК 621.39(075.8)

ББК 32.973(я73)

**Голиков А.М.**

**Системы радиосвязи и сети телерадиовещания. Курс лекций, компьютерные лабораторные работы, компьютерный практикум, задание на самостоятельную работу.** — Изд. перераб. и доп. [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Томск: ТУСУР, 2018. — 354 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/>

**Учебное пособие является учебно-методическим комплексом дисциплины (УМКД) "Системы радиосвязи и сети телерадиовещания" специалитета: 10.05.02 Информационная безопасность телекоммуникационных систем и включает курс лекций, компьютерные лабораторные работы, компьютерный практикум, задание на самостоятельную работу.**

В учебном пособии рассмотрены современные сети и системы радиосвязи, включая системы цифровой радиорелейной связи, аналоговые и цифровые системы транкинговой связи, системы сотовой связи стандарта GSM, сети и системы радиотелефонной связи, использующие стандарты IS-95 (CDMA) и DECT, стандарты кодирования информации в пейджинговых сетях, перспективные спутниковые системы связи, включая спутниковые системы персональной радиосвязи, стандарты беспроводных локальных сетей IEEE 802.11, персональные сети радиодоступа стандартов IEEE 802.15, стандарты городских сетей широкополосного радиодоступа IEEE 802.16 (WiMAX), а также средства информационной защиты сетей и систем радиосвязи, предусмотренные соответствующими стандартами, системы цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T и DVB-T2, 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, системы спутниковой связи DVB-RCS2.

Методика обучения состоит в теоретическом освоении материала и компьютерном практикуме, заключающемся в моделировании систем в MATLAB 15b и исследовании характеристик системы.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Системы цифровой радиорелейной связи	7
2. Транкинговые системы радиосвязи	35
3. Системы мобильной связи стандарта GSM	92
4. Системы мобильной связи стандарта CDMA	111
5. Системы мобильной связи стандарта IEEE 802.11(WiFi)	135
6. Системы мобильной связи стандарта IEEE 802.15.4 ZigBee	158
7. Системы мобильной связи стандарта IEEE 802.15.1(Bluetooth)	170
8. Системы мобильной связи стандарта IEEE 802.16 (WiMAX)	185
9. Системы мобильной связи LTE	222
10. Системы цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T и DVB-T2	250
11. Системы цифрового спутникового телевизионного вещания DVB-S и системы высокоскоростного цифрового спутникового ТВ-вещания DVB-S2	268
12. Системы цифрового кабельного телевизионного вещания DVB-C и системы высокоскоростного цифрового кабельного ТВ-вещания DVB-C2	276
13. Системы цифрового мобильного телевизионного вещания DVB-H и системы высокоскоростного цифрового мобильного ТВ-вещания DVB-H2	298
14. Исследование характеристик широкополосной Системы спутниковой связи DVB-RCS2	315
15. Оптимизация методов помехоустойчивого кодирования для систем связи (задание на самостоятельную работу)	332
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	351
ЛИТЕРАТУРА	353

## **ВВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие предназначено для изучения современных сетей и систем цифровой радиосвязи и средств их информационной защиты студентами специальности 090302.65 – Информационная безопасность телекоммуникационных систем

Цифровая радиосвязь это одна из наиболее динамично развивающихся областей телекоммуникаций. Ожидается, что в течение следующих десяти лет не менее половины всех устанавливаемых соединений станут частично или полностью беспроводными. Системы подвижной радиосвязи перешли из разряда дорогих игрушек для богатых пользователей в массовый сектор рынка. Быстрое развитие сети Интернет, ее приложений и новых услуг создало благоприятную почву для дальнейшего развития мобильных систем.

В настоящее время цифровая радиосвязь позволяет реализовать полный спектр информационных услуг: передачу телефонных сообщений, обмен данными, подключение к глобальным информационным сетям, получение и передачу видеоизображений, телевидения и т.д. Радиосвязь дополняет и расширяет возможности проводной связи, дает свободу передвижения. Применение средств радиосвязи реализует единое информационное пространство, позволяющее в любой точке планеты и в любое время получать необходимые информационные услуги.

В последние годы в мире наблюдается повышенный интерес к системам беспроводного доступа, а также лавинный рост производства оборудования. В результате оборудование от различных производителей появляется практически сразу после объявления о стандартизации технологии. Несмотря на недавнее происхождение, понятия BWA, WiFi, RLAN, WiMAX, FWA, WLAN и др. прочно вошли в обиход специалистов в области радиосвязи.

Сегодня все более ощущается потребность в качественных, надежных и емких каналах связи. Если в Европе на магистральных линиях основную роль играют волоконно-оптические линии связи, то на просторах России прокладка оптоволоконной линии связи может иметь слишком высокую стоимость. Применение цифровых радиорелейных систем (ЦРРС) позволит значительно снизить расходы на эксплуатацию такой линии связи.

В настоящее время профессиональная мобильная радиосвязь обеспечивается цифровыми транкинговыми системами связи. В России заказчиками систем профессиональной мобильной радиосвязи являются крупные ведомства и корпорации, такие как РАО ЕЭС, Минтранс, МПС, Сибнефть и другие, а также силовые структуры и правоохранительные органы.

Бурно развивающиеся сети сотовой связи сейчас предоставляют пользователям широкий диапазон услуг и возможность применять разнообразное оборудование для

передачи речевых сообщений и данных, вызывных и аварийных сигналов, подключаться к телефонным сетям общего пользования (PSTN), сетям передачи данных (PDN) и цифровым сетям с интеграцией служб (ISDN).

Спутниковая связь составляет относительно небольшой удельный вес в общем объёме телекоммуникационной индустрии, однако темпы развития спутниковой связи стремительно наращиваются в последние годы. В последнее десятилетие распространение получили малоапертурные наземные станции типа VSAT, обеспечившие возможность организации межрегиональных и корпоративных спутниковых телекоммуникаций с голосовой связью и цифровой передачей данных "из конца в конец" при достаточно низкой стоимости.

Беспроводные сети и системы связи является наиболее уязвимыми, с точки зрения защиты передаваемой информации, поэтому современные стандарты включают в себя особые требования к средствам их информационной защиты.

## 1. 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 внутризоновых 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 большего 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, внутризоновые – 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 РРСЦ, 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 промышленные 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 неискаженной, 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.

### **Плезиохронная цифровая иерархия**

Плезиохронная 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 плезиохронная цифровая иерархия PDH, или ПЦИ, сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 - 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
<b>0</b>	64	64	64
<b>1</b>	1544	1544	2048
<b>2</b>	6312	6312	8448
<b>3</b>	44736	32064	34368
<b>4</b>	—	97728	139264

глобальных телекоммуникаций в мире в целом, поэтому комитетом по стандартизации ITU-T 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 1.1 схематично представлен результат, полученный после стандартизации.

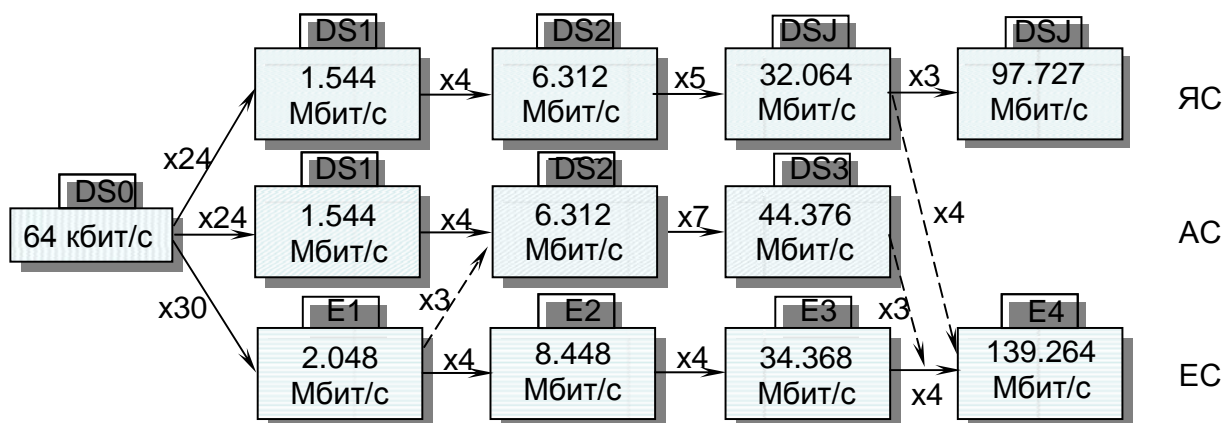


Рис. 1.1-Схема мультиплексирования и кросс-мультиплексирования в американской, японской и европейской цифровых иерархиях

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 демупльтиплексировании 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 демупльтиплексирования на приемной стороне, что приводит к достаточно сложной аппаратурной реализации таких систем.

Еще одним недостатком систем передачи плезиохронной 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 подходы 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. Его упрощенная структура дана на рисунок 1.1.. 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. 1.2 – 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 мультиплексору, где этот транспортный модуль будет переформировываться. Данная часть заголовка так и называется: секционный заголовок мультиплексора (MSON). Верхние  $3 \cdot 9 = 27$  байтов (до указателя) представляют собой секционный заголовок регенератора (RSON), 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 (POH) 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 1.3).

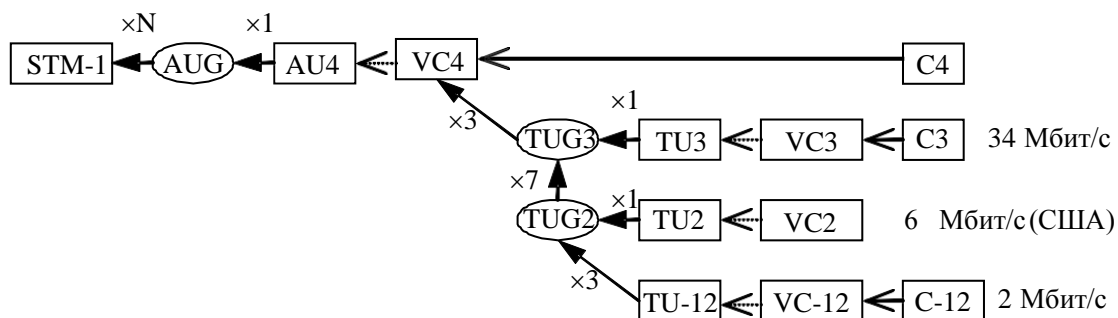


Рис. 1.3 -Упрощенная схема преобразования в SDH

Плезиохронные цифровые потоки всех уровней размещаются в контейнерах С 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 демultipлексирования. 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 1.4.

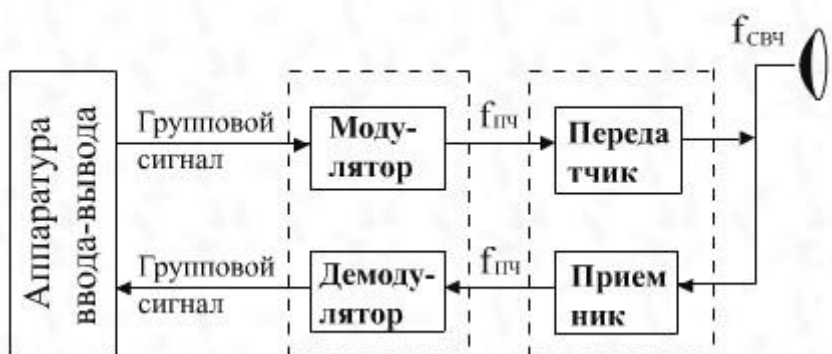


Рис. 1.4 – Структурная схема ОС

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 малокабельных 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 1.5.

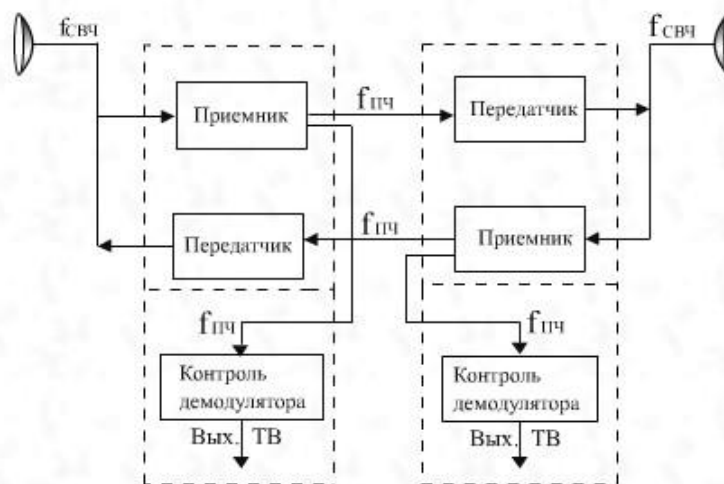


Рис. 1.5-Структурная схема ПС

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 1.6.

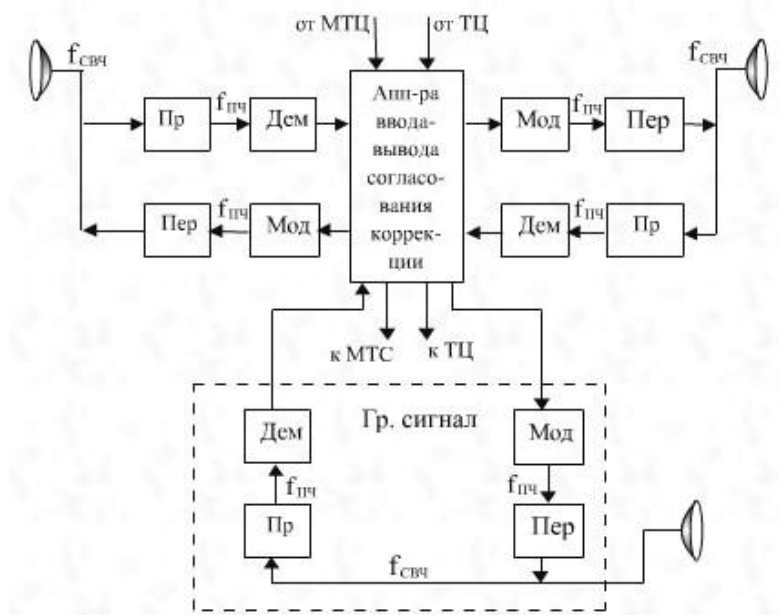


Рис. 1.6-Структурная схема УС

### Основные требования, предъявляемые к антеннам РРЛ

В настоящее время на РРЛ прямой видимости применяются передатчики мощностью  $2 \div 10$  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 1.7);
- четырехчастотный план (рисунок 1.8);
- шестичастотный план (рисунок 1.9).

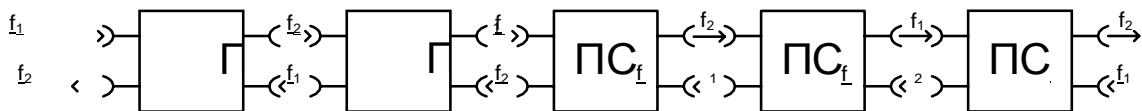


Рис. 1.7. Схема двухчастотного плана

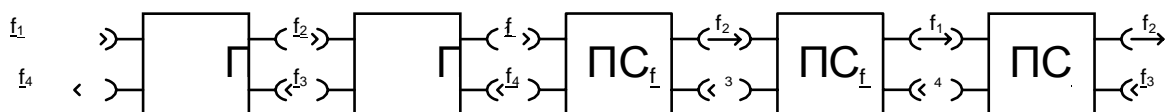


Рис. 1.8. Схема четырехчастотного плана

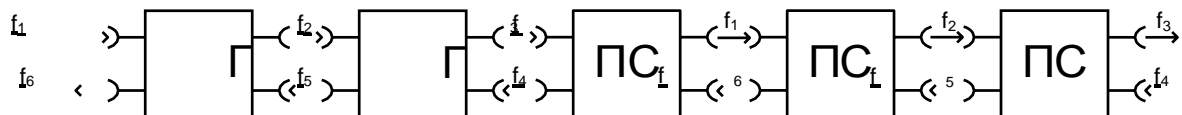


Рис. 1.9. Схема шестичастотного плана

**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 внутризонавых 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”.

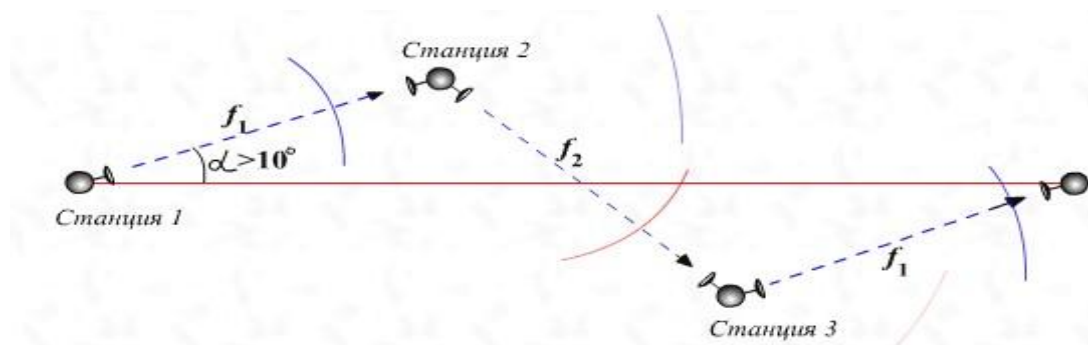


Рис. 1.10. Расположение станций РРЛ

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 1.10).

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 1.11.

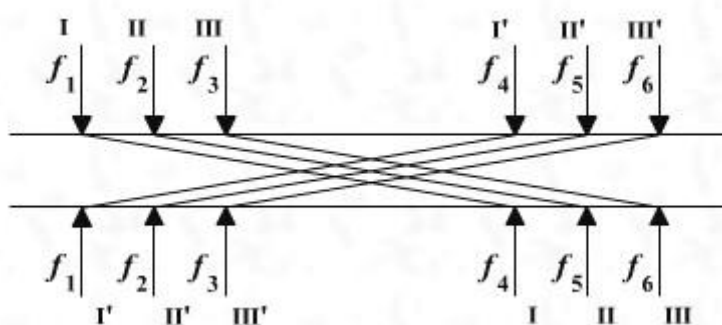


Рис. 1.11 - План с разнесенными частотами приема и передачи

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 1.12).

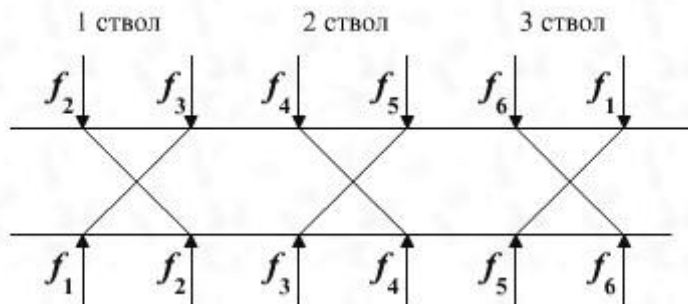


Рис. 1.12 – План с чередованием частот приема и передачи



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:

$$F_H = 7400 - 164.5 + 28 \cdot n \quad (1.1)$$

$$F_B = 7400 - 3.5 + 28 \cdot n \quad (1.2)$$

Формула 1.1 позволяет рассчитать нижнюю рабочую частоту приемо-передатчика, а формула 1.2 – 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, ветроэлектродгенераторов 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 ЦРРС 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 (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Радиорелейное оборудование зарубежных производителей

<b>Тип РРС</b>	<b>Диапазон, ГГц</b>	<b>Производитель</b>	<b>Система</b>
<b>TRuepoint</b>	6-38	Harris	SDH STM-1 (также может работать в PDH-сетях)
<b>MegaStar</b>	5,6,7,8, 11	Harris	SDH STM-1
<b>Pasolink+</b>	6-38	NEC	SDHSTM-1
<b>DMR 3000S</b>	4-11	NEC (сертифицирована в 2003 г.)	SDHSTM-1
<b>Mini-Link High Capacity</b>	18	Ericsson	SDH STM-1
<b>Altium MX</b>	6-38	Stratex Networks	SDHSTM-1
<b>Eclipse</b>	7, 15, 18	Stratex Networks	SDHSTM-1
<b>SRT1F</b>	4-13	Siemens (сертифицирована в 2003 г.)	SDHSTM-1
<b>SRA4</b>	6-38	Siemens (сертифицирована в 2003 г.)	SDHSTM-1
<b>CityLink</b>	5-38	NERA	SDH STM-1 (также может работать в PDH-сетях)
<b>InterLink</b>	5-38	NERA	SDHSTM-1

Среди них выделяются три производителя - NEC (ЦРРС 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. ЦППС DMR 3000S обеспечивает увеличение пропускной способности до 16 потоков по 155,52 Мбит/с, MegaStar - до 7 потоков уровня STM-1.

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

Для применения на внутризоновых ЦРПЛ и линиях относительно небольшой протяженности представляют интерес ЦППС Pasolink+ (NEC), TRuepoint (Harris), InterLink и CityLink (NERA). Пропускная способность каналаобразующей 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, оборудования фирмы «Микран» не позволяет нижнее размещения

высокочастотного оборудования, что также является большим минусом при его эксплуатации. Тем не менее, определившись с производителями оборудования и представляемыми ими линейками, проведем сравнительный анализ и представим результаты в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сравнительный анализ радиорелейного оборудования

№	Параметр	МИКРАН МИК- РЛ7...15С	Nera Interlink	Nec DMR 3000S	Nec Pasolink+
1	Диапазон частот, ГГц	7-15	3-11	4-11	6-38
2	Пропускная способность	STM-1	От STM-1 до 16 STM-1	От STM-1 до 16 STM-1	От STM-0 до 2 STM-1/OC3
3	Разнос каналов, МГц	28-56	30-40	30-40	28-56
4	Тип модуляции	16 QAM, 64 QAM, 128 QAM	64 QAM, 128 QAM	64 QAM, 128 QAM	32 QAM, 128 QAM
5	Выходная мощность передатчика, дБм	21-27	26-29	30-33	10.5-25
6	Порог приемника, BER $10^{-6}$ , дБм	-(65-76)	-(68-72)	-(67-77)	-(67-68)
7	Система резервирования	1+0; 1+1; 2+0; 2+1; 3+0; 3+1	от 1+0 до 8+0 без резерва, от 1+1 до 7+1 с резервом	до 11+1	1+0; 1+1; 2+0
9	Служебная связь	2 x 64 кбит/с	3 x 64 кбит/с	4 x 64 Кбит/с	2 x 64 кбит/с
10	Управление сетью	ПО «Магистраль»	Nera NMS/LCT	MS3201	PNMS / PNMT
11	Расположение аппаратуры	верхнее	Верхнее и нижнее	Верхнее и нижнее	Верхнее и нижнее

#### 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 внутризоновых, 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. 1.13 – Общий вид радиорелейной аппаратуры SDH 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 приёмопередатчиков 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. 1.14 – 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 x 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 Rocket-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.

## 2. 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, коммутирует 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, широковещательный), 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 ТСР 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.

Таблица 2.1 – Зависимость числа абонентов от числа радиоканалов

Число каналов	Общее число абонентов
6	320
11	790
21	1760
25	2160

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 SmarTrunk 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.

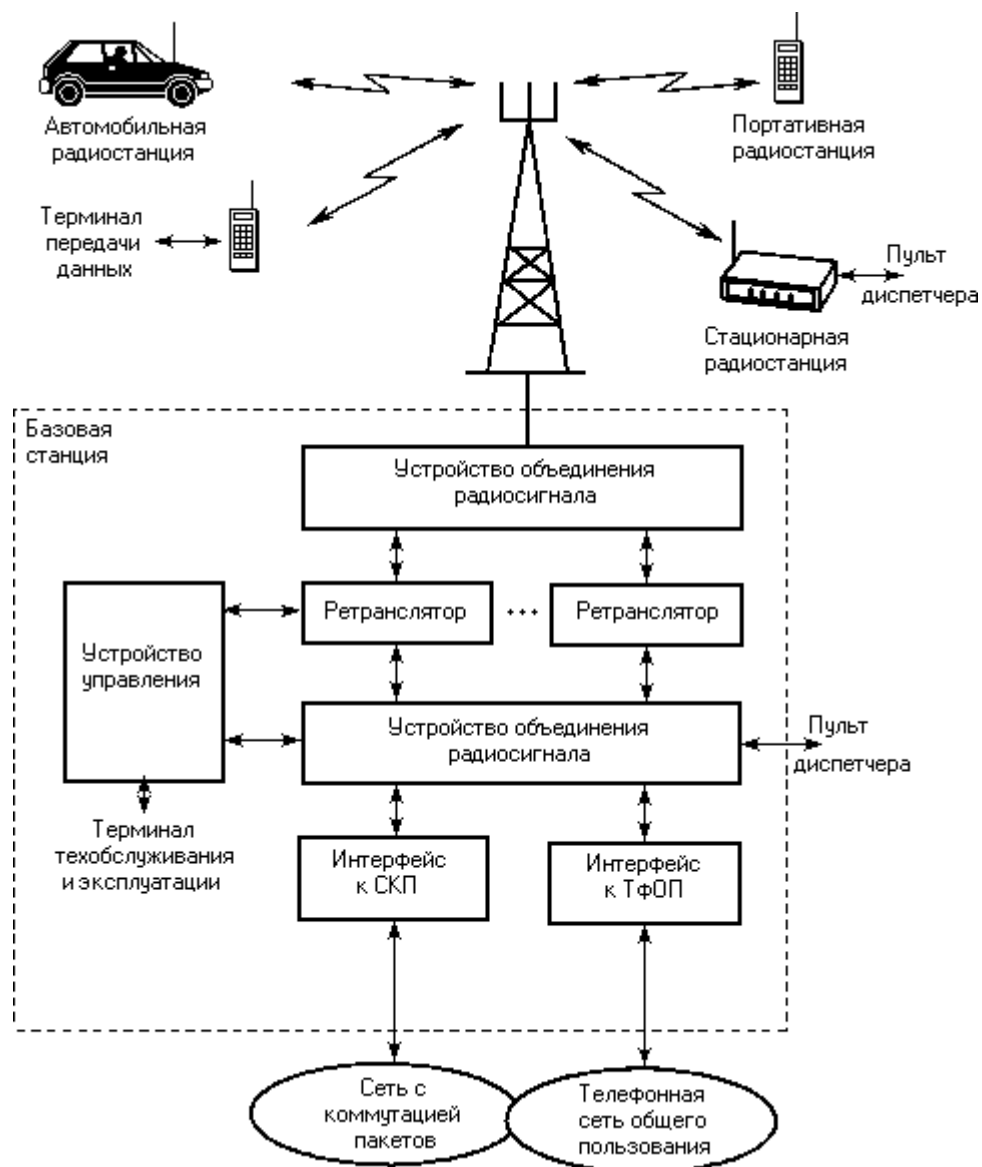


Рис. 2.1. Обобщенная структура однозонавой транкинговой системы

**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 радиоинтерфейса. 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.

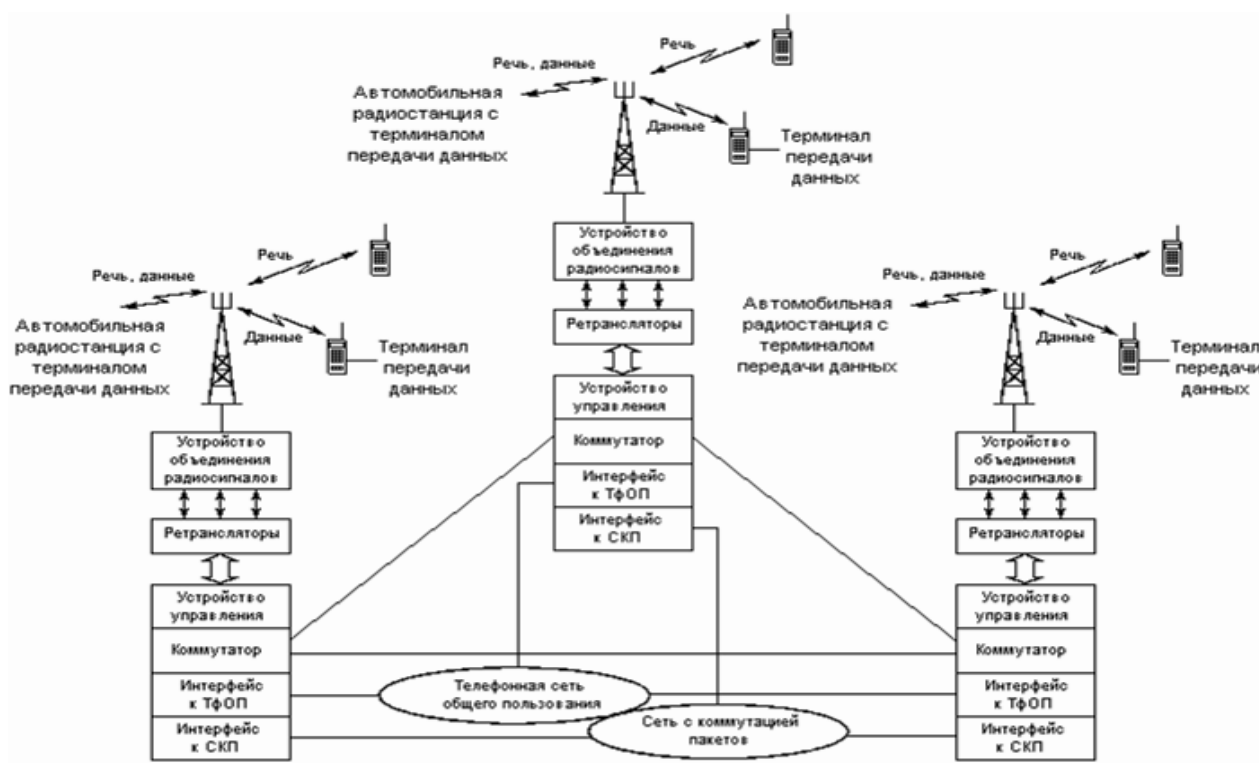


Рис. 2.2. Обобщенная структура транкинговой системы с распределенной межзональной коммутацией

Все же, использование распределенной межзональной коммутации пригодно лишь для систем с небольшим количеством зон и с невысокими требованиями к оперативности транзональных 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 2.3.

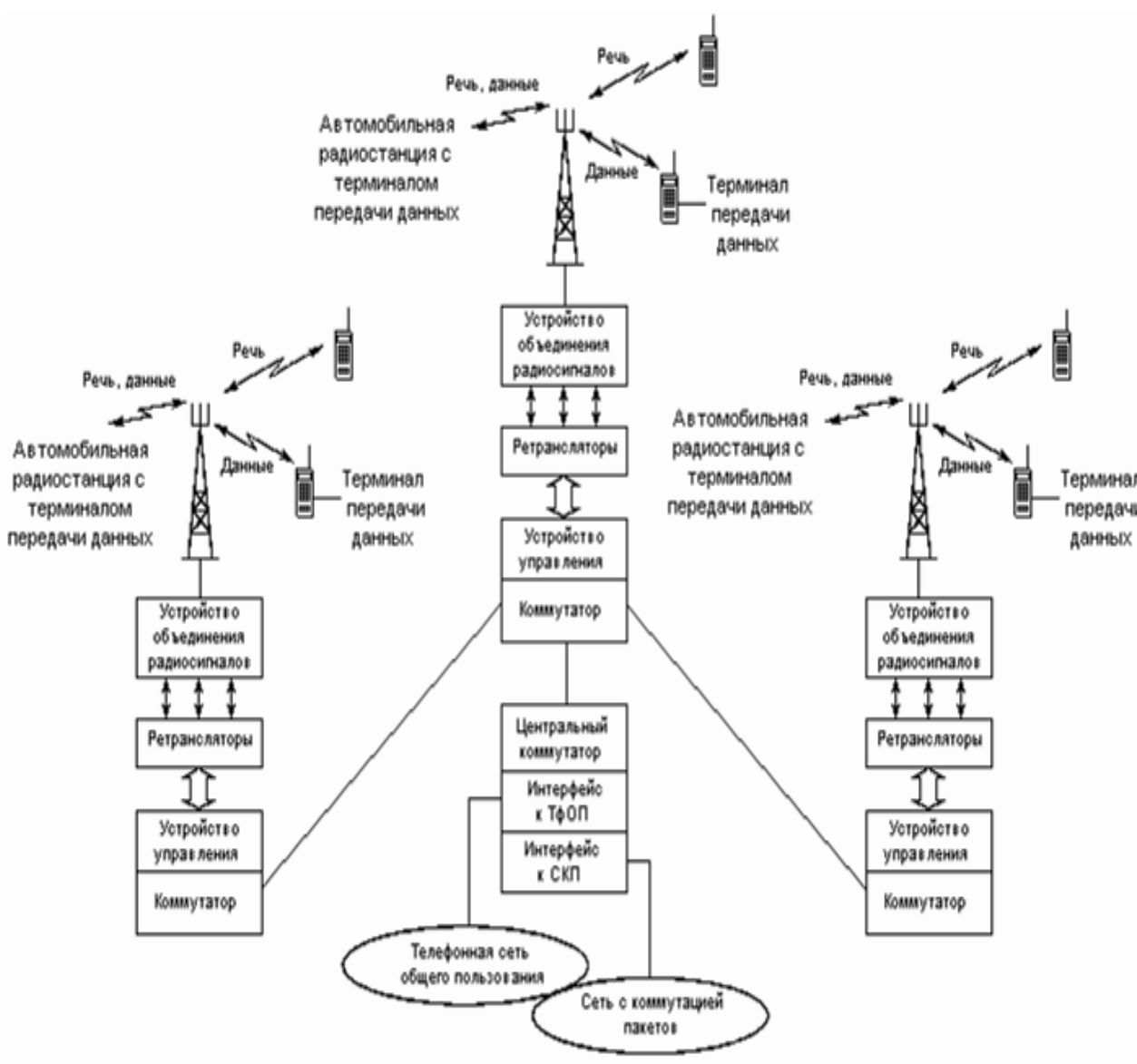


Рис. 2.3. Обобщенная структура транкинговой системы с централизованной межзональной коммутацией

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, недорогая) 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.

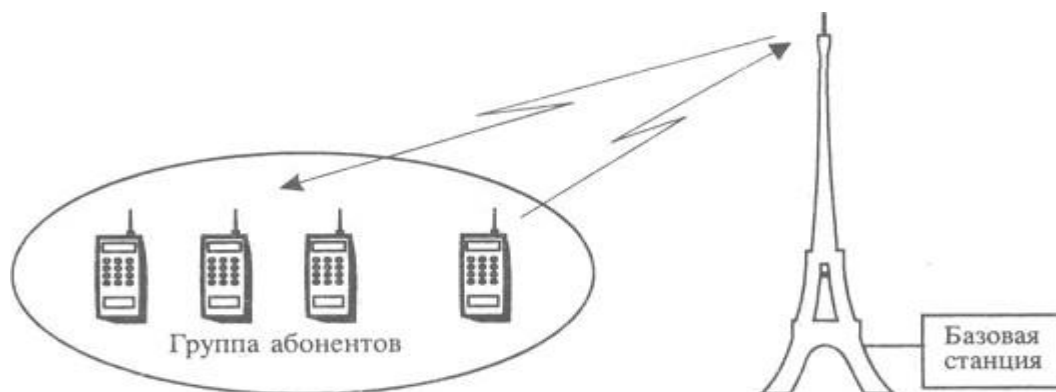


Рис. 2.4. Групповой вызов

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).

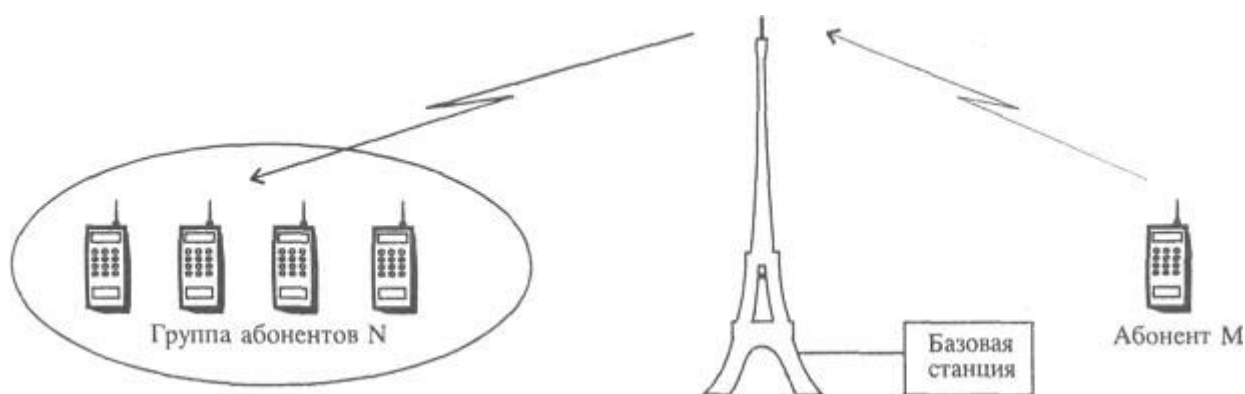


Рис. 2.5. Вызов произвольно выбранной группы

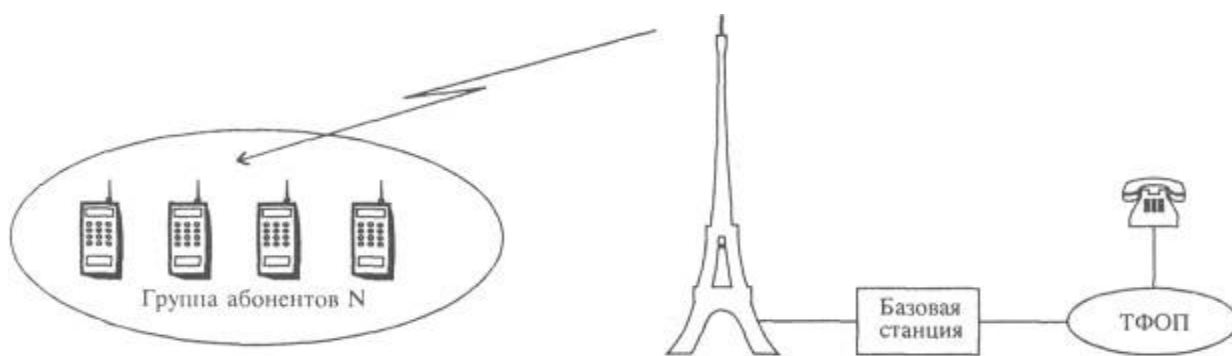


Рис. 2.6. Вызов группы из ТФОП

Персональный внутренний вызов (см. рис. 2.7) является более привилегированным типом вызова. Для его посылки 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).

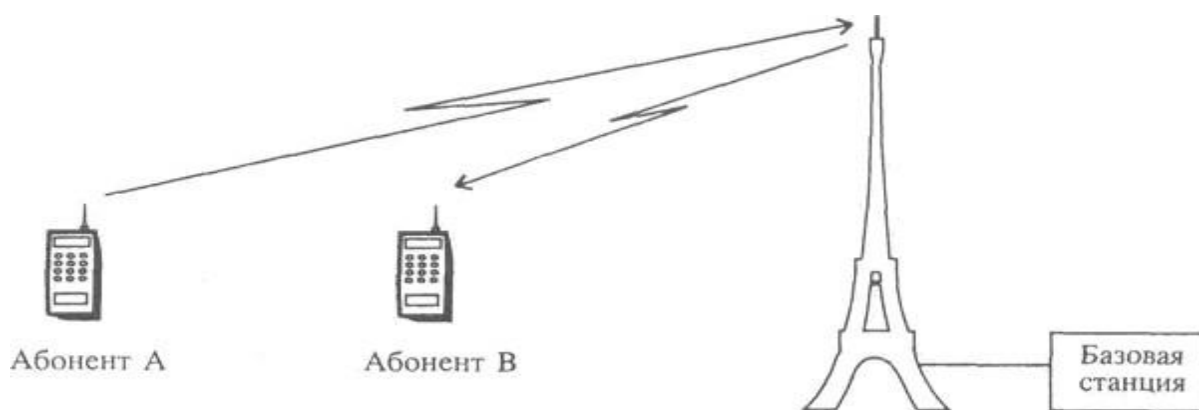


Рис. 2.7. Персональный вызов

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 нагрузку 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 нагрузке 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. 2.8).



Рис. 2.8. 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 SmarTrunk II имеется так называемый радиокиллер: при послыке 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 несвязаны 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 2.2

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 отправки 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 отправки 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, отправки 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 отправки вызова, который в наибольшей степени отвечает ситуации. В сотовых системах, являющихся расширением ТфОП, единственным средством отправки 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 SmarTrunk, 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 однозоновом варианте (до 24 каналов в базовой станции), так и в многозонном (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 MPT1327, 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 MPT1327 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 MPT1327. Как уже было отмечено выше, применение транкинговой

системы MPT1327 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 MPT1327, 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 MPT1327 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 MPT1327, 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 МРТ1327.

### **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 кому-либо, кроме санкционированного получателя) и защиты от несанкционированного доступа к системе (исключение возможности захвата управления системой и попыток вывести ее из

стройка, 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, широкополосный 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-кассy". 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. 2.9).



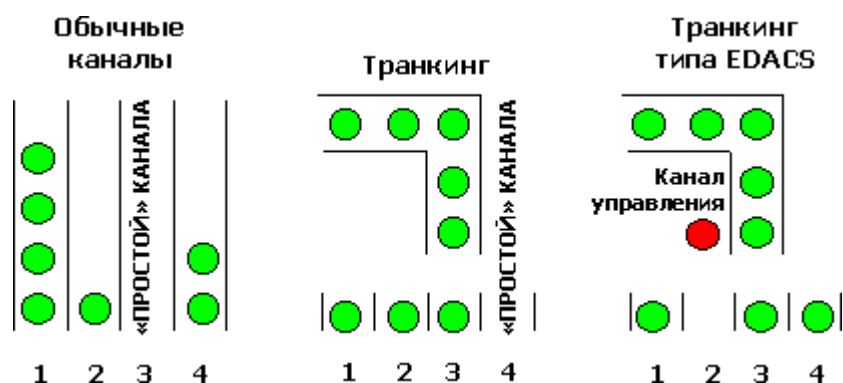


Рис. 2.9. Организация очередей

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 Трансьевропейское 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.

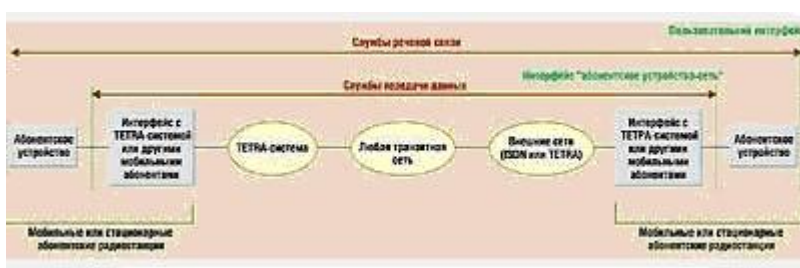


Рис. 2.10. Структура служб системы TETRA

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.

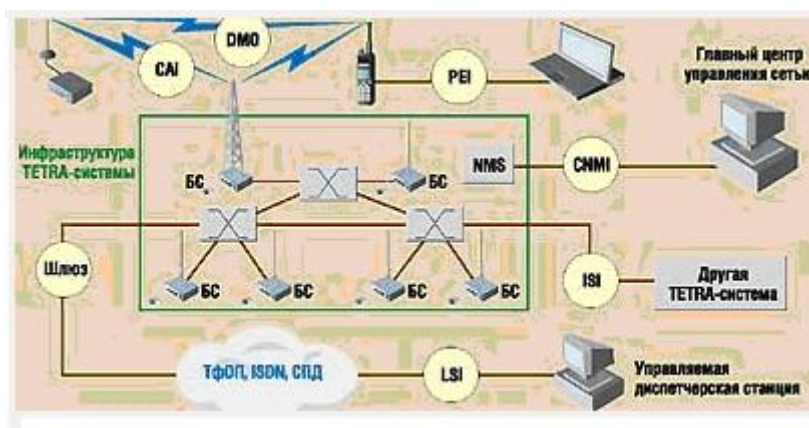


Рис. 2.11. Стандартные интерфейсы TETRA-систем

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.

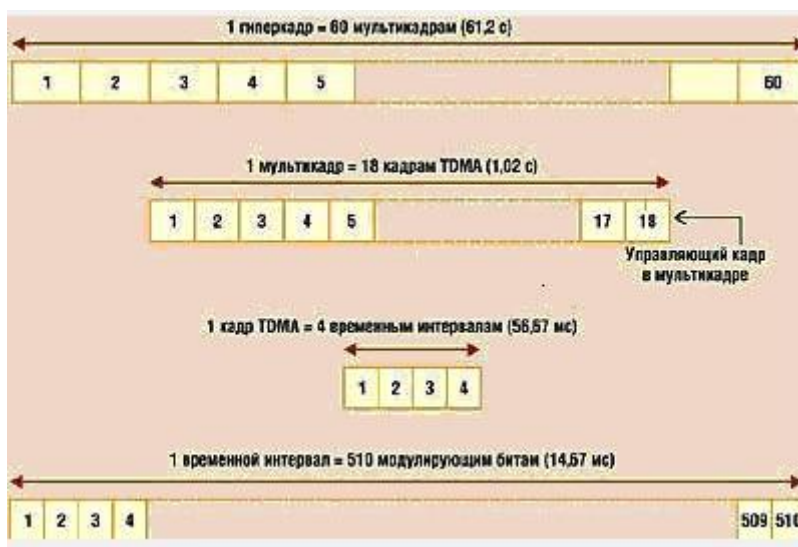


Рис. 2.12. Структура кадра TETRA

В системах стандарта TETRA V+D используется метод многостанционного доступа с временным разделением (МДВР) 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 перекрывается 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 радиointерфейса 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 S4FM 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.

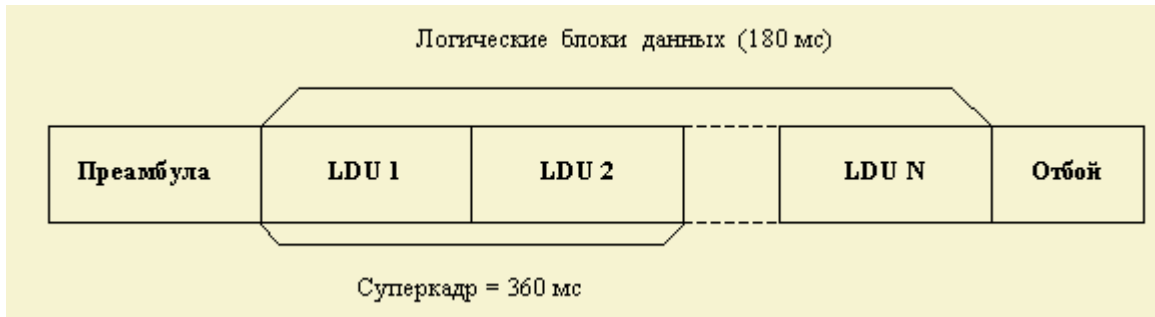


Рис. 2.13. Структура речевого сообщения в стандарте APCO 25

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.2.14.

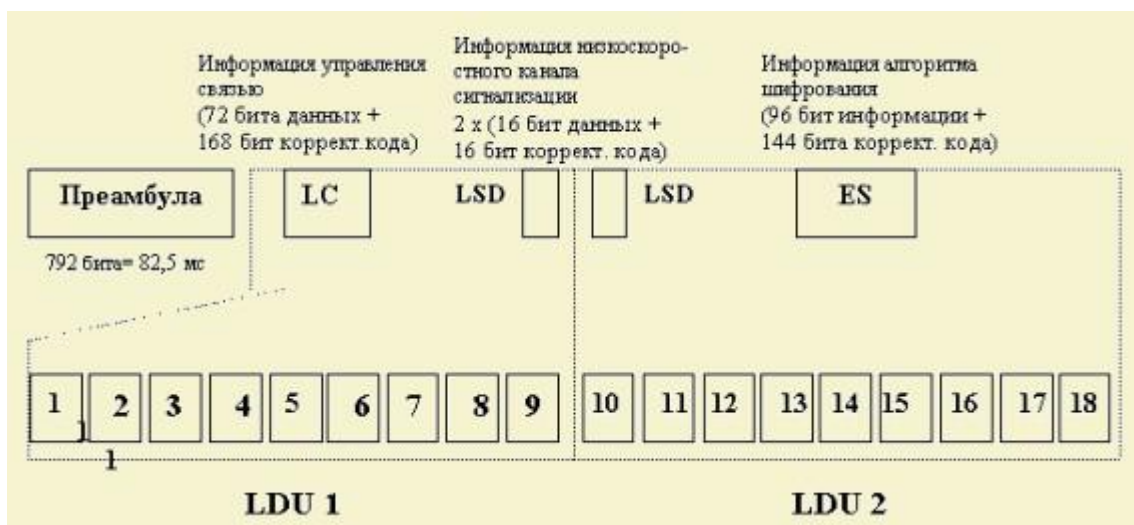


Рис. 2.14. Структура речевого суперкадра в стандарте APCO 25

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 АРСО 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.

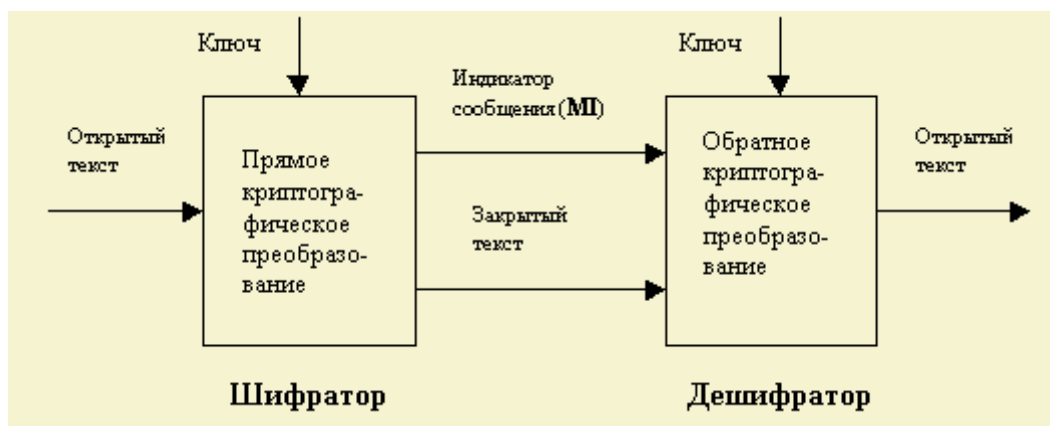


Рис. 2.15. Модель криптопреобразования информации в стандарте АРСО 25

На передающей стороне открытый текст сообщения поступает на шифратор, где на основе ключа и определенного криптографического алгоритма преобразуется в шифрованный текст той же длины, после чего передается по радиоканалу. Вместе с шифрованным 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 шифрованный текст преобразуется в открытый.

В различных режимах используются различные модификации общей модели криптозащиты информации, показанные на рис.2.16.:

- а) ECB – Electronic Code Book;
- б) OFB – Output Feed Back;
- в) CFB – Cipher Feed Back.

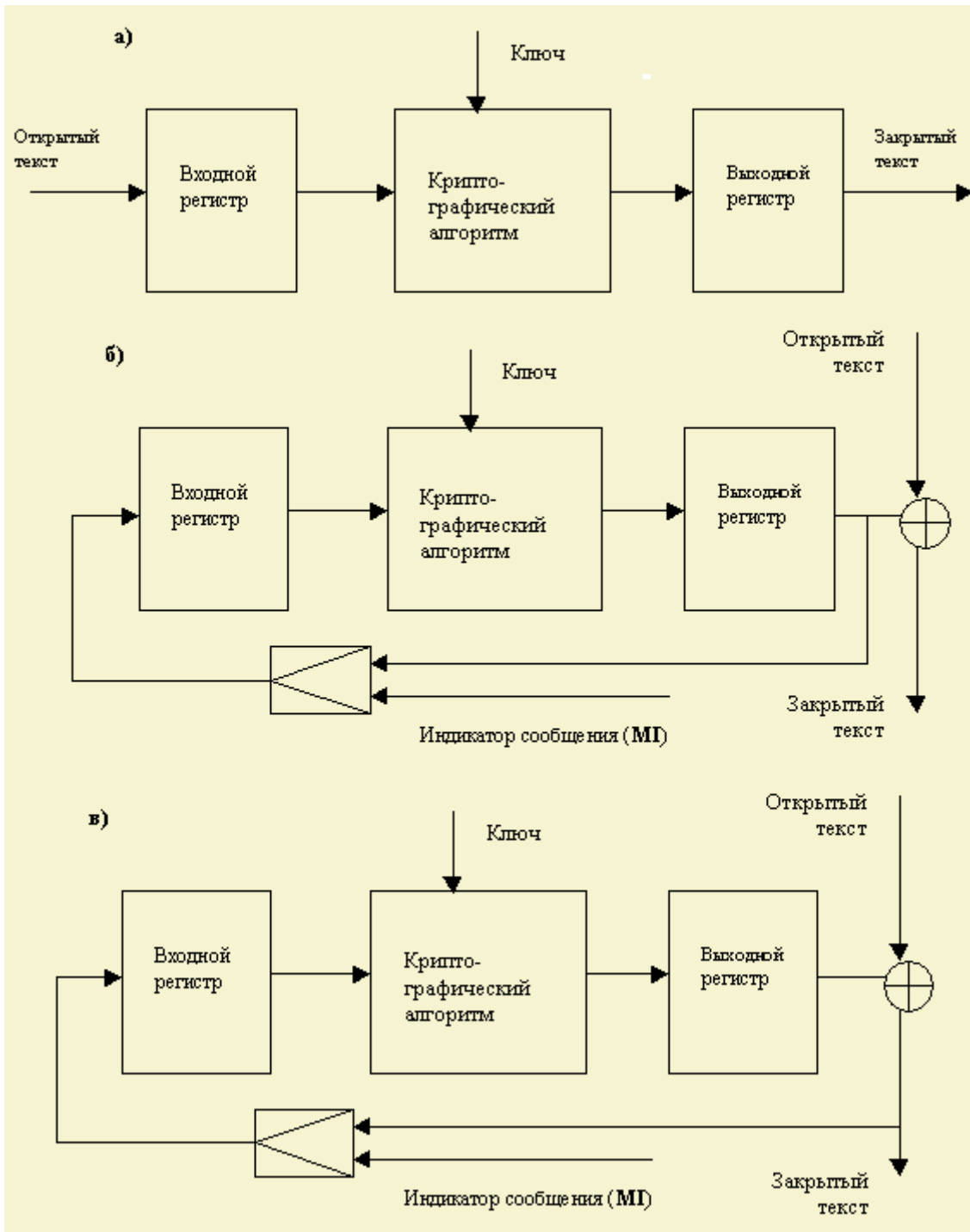


Рис. 2.16. Разновидности криптографических преобразований информации

*Конфиденциальность связи* достигается шифрованием трафика речи и данных, которое осуществляется по методу OFB (рис. 2.16б).

*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. 2.16б) и добавления к сообщению специального аутентификационного кода (MAC – Message Authentication Code), который генерируется по варианту CFB (рис. 2.16в). 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 (рис.4а).

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 преимуществах 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, такими 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 отправки 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 Ascopole) 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 таиландской 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 2.4.

Таблица 2.4. Основные сведения и технические характеристики стандартов EDACS, TETRA, APCO 25, Tetrapol, iDEN

№	Характеристика стандарта (системы) связи	EDACS	TETRA	APCO25	Tetrapol	iDEN
1	Разработчик стандарта	Ericsson	ETSI	APCO	Matra Comm.	Motorola
2	Статус стандарта	корпорат.	открытый	открытый	корпорат.	корпорат.
3	Основные производители радиосредств	Ericsson	Nokia, Motorola, OTE, Rohde & Schwarz	Motorola, Tait Electr., E.F.Johnson Inc., Transcrypt	Matra, Nortel, CS Telecom	Motorola
4	Возможный диапазон рабочих частот, МГц	138-174; 403-423; 450-470; 806-870	138-174; 403-423; 450-470; 806-870	138-174; 406-512; 746-869	70-520	805-821/ 855-866
5	Разнос между частотными каналами, кГц	25; 12,5	8	12,5; 6,25	12,5; 10	25
6	Эффективная полоса частот на один речевой канал, кГц	25	6,25	12,5; 6,25	12,5; 10	4,167

7	Время установления канала связи, с	0,25	0,2 с	0,5	не более 0,5	не более 0,5
8	Метод разделения каналов связи	МДЧР	МДВР (с МДЧР в многозон. системах)	МДЧР	МДЧР	МДВР

Функциональные возможности, предоставляемые системами стандартов цифровой транкинговой радиосвязи, представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Функциональные возможности стандартов

№	Функциональные возможности системы связи	EDACS	TETRA	APCO 25	Tetrapol	IDEN
1	Поддержка основных видов вызова (индивид., групповой, широковещ.)	+	+	+	+	+
2	Выход на ТФОП	+	+	+	+	+
3	Полнодуплексные абонентские терминалы	+	+	-	-	+
4	Передача данных и доступ к централизованным базам данных	+	+	+	+	+
5	Режим прямой связи	+	+	+	+	н/с
6	Автоматическая регистрация мобильных абонентов	+	+	+	+	+
7	Персональный вызов	-	+	+	+	+
8	Доступ к фиксированным сетям IP	+	+	+	+	+
9	Передача статусных сообщений	+	+	+	+	+
10	Передача коротких сообщений	-	+	+	+	+

11	Поддержка режима передачи данных о местоположении от системы GPS	+	+	н/с	+	н/с
12	Факсимильная связь	-	+	+	+	+
13	Возможность установки открытого канала	-	+	н/с	+	-
14	Множественный доступ с использованием списка абонентов	-	+	+	+	+
15	Наличие стандартного режима ретрансляции сигналов	н/с	+	+	+	н/с

Примечание: (н/с - нет сведений)

Таблица 2.6. Услуги связи, предоставляемые представителям  
служб общественной безопасности

№	Специальные услуги связи	EDACS	TETRA	APCO 25	Tetrapol
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 поддержаны 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 разворачивания 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

### 3. 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 ВТ — 0,3, где В — ширина полосы фильтра по уровню минус 3 дБ, Т — 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 (СЕРТ)*, 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>[31]</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 пользователей 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-A MPS**

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), <a href="#">МГц</a>	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, <a href="#">МГц</a>	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, накрываемая 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 межсетевых 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 Ki 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

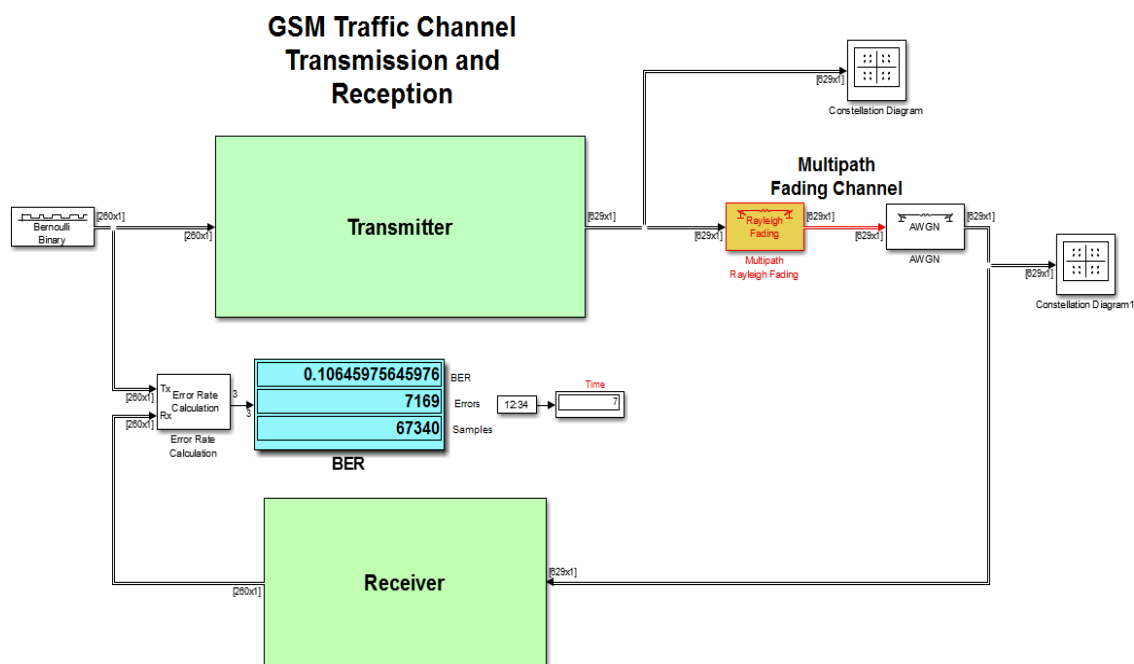


Рис. 3.2. Модель GSM в Simulink MATLAB 2015

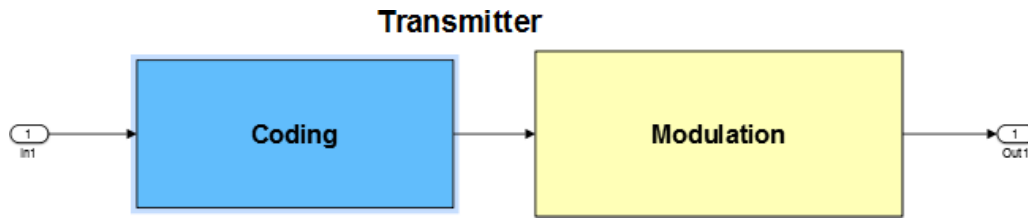


Рис. 3.3. Схема передатчика

### Coding

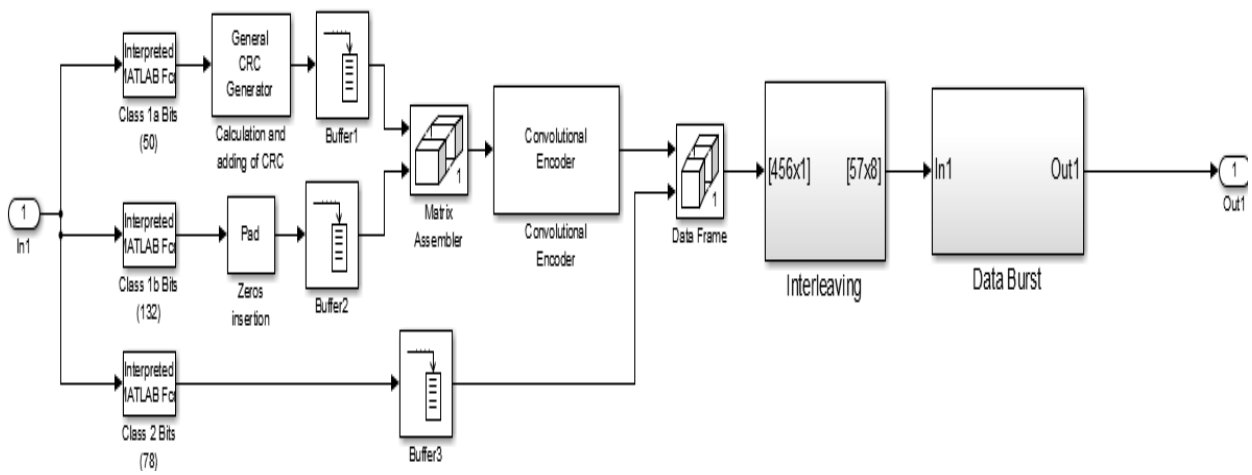


Рис. 3.4. Схема кодера

### Modulation

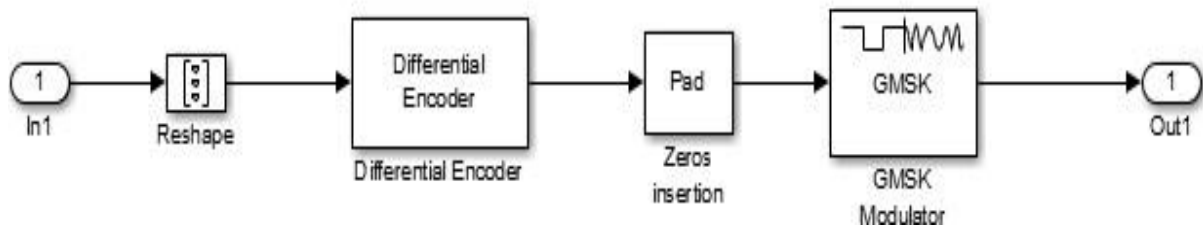


Рис. 5.5. Схема модулятора

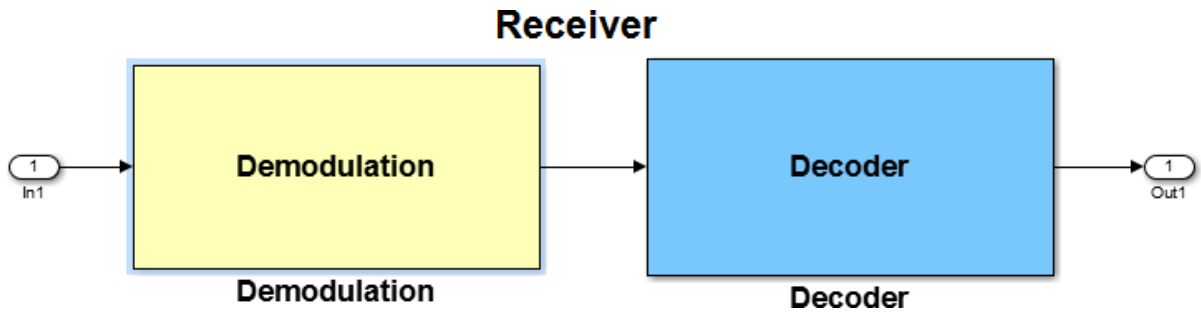


Рис. 3.6. Схема приемника

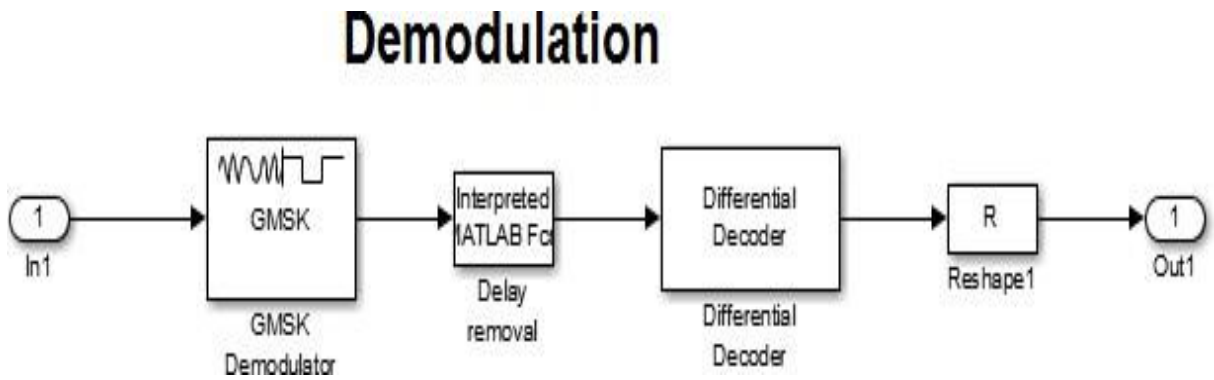


Рис. 3.7. Схема демодулятора

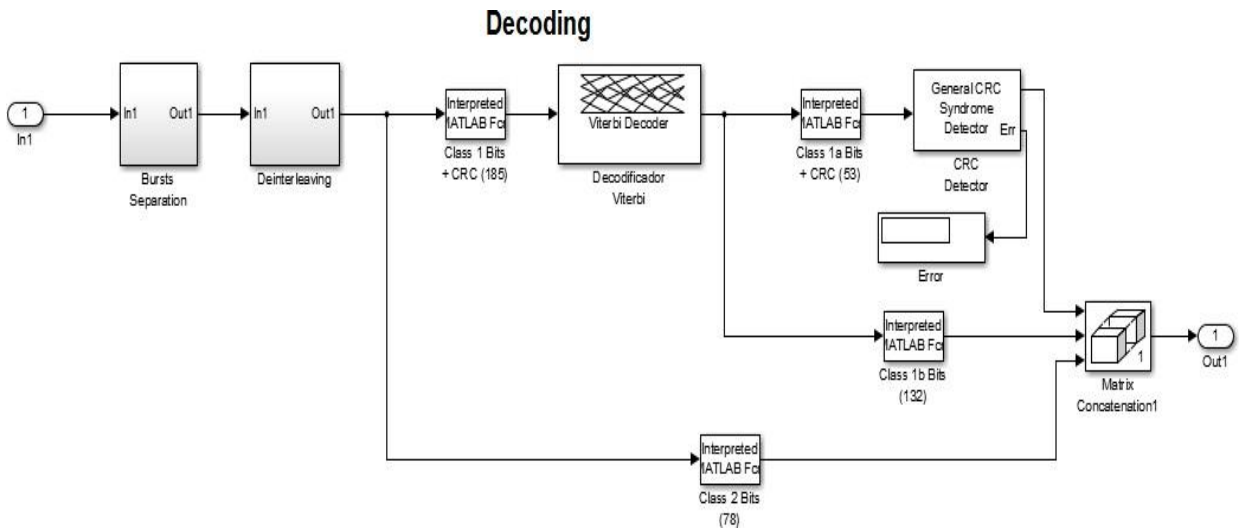


Рис. 3.8. Схема декодера

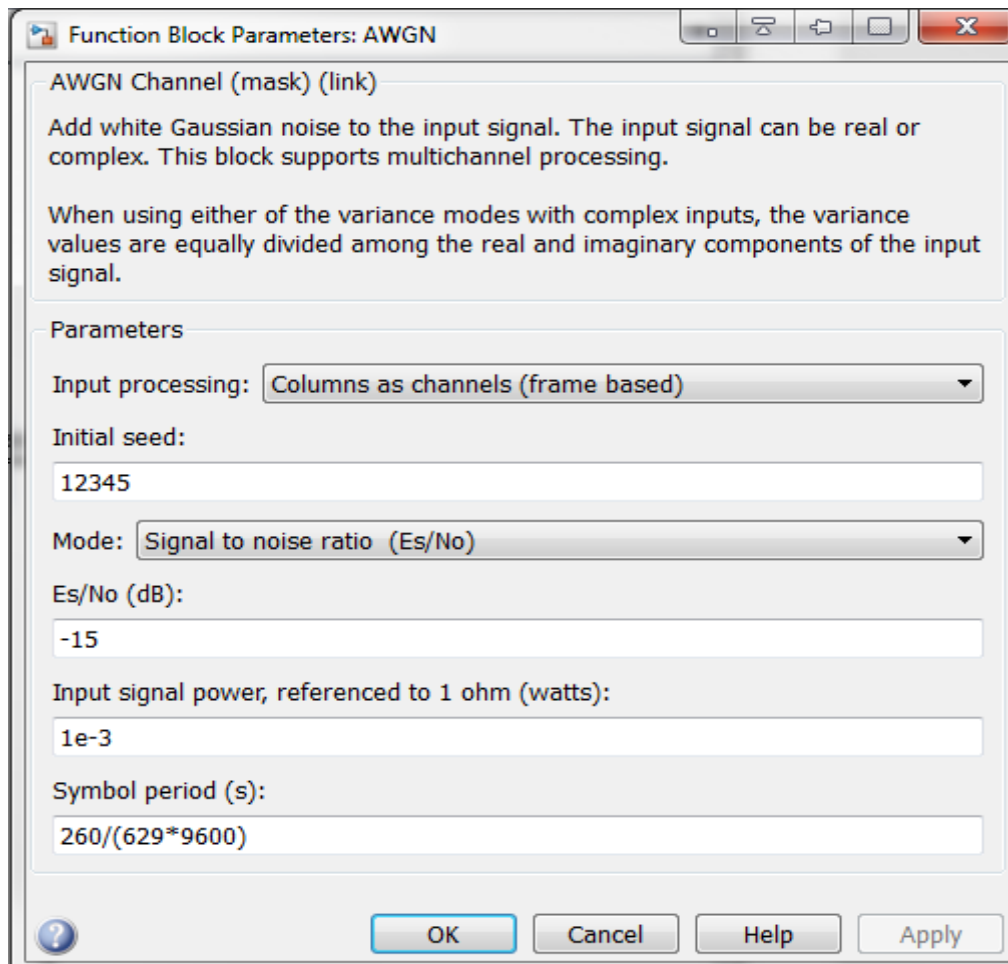


Рис. 3.9. Изменение отношения сигнал/шум.

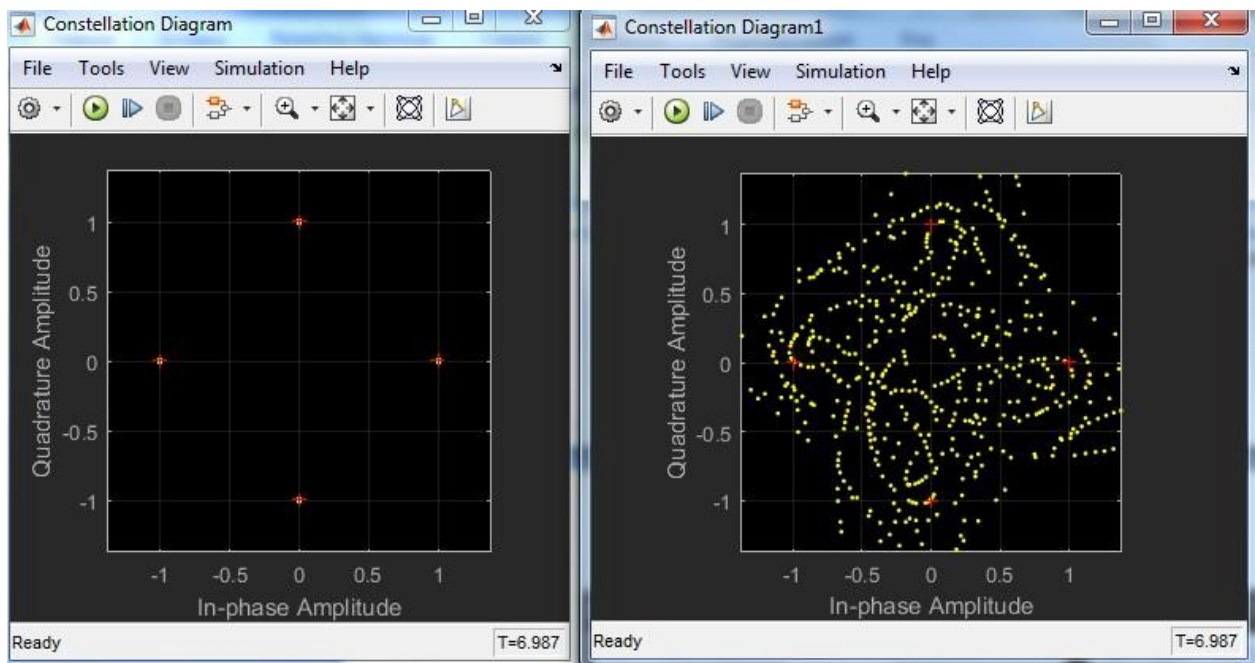


Рис. 3.10. Сравнение передаваемого созвездия и принятого, при отношении С/Ш – 20 Дб.

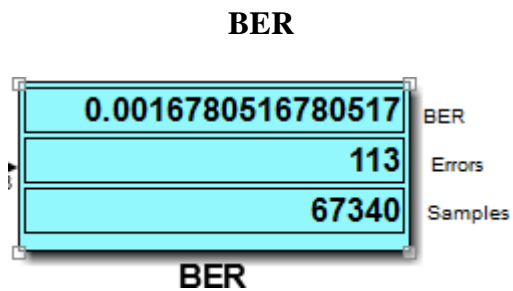


Рис. 3.11. BER при отношении С/Ш 15 Дб.

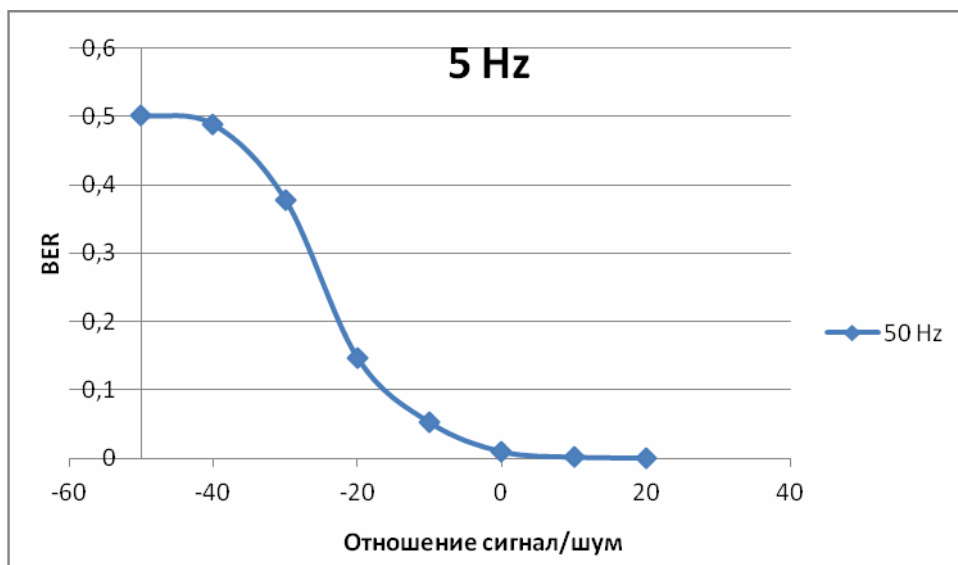


Рис. 3.12. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 5 Гц

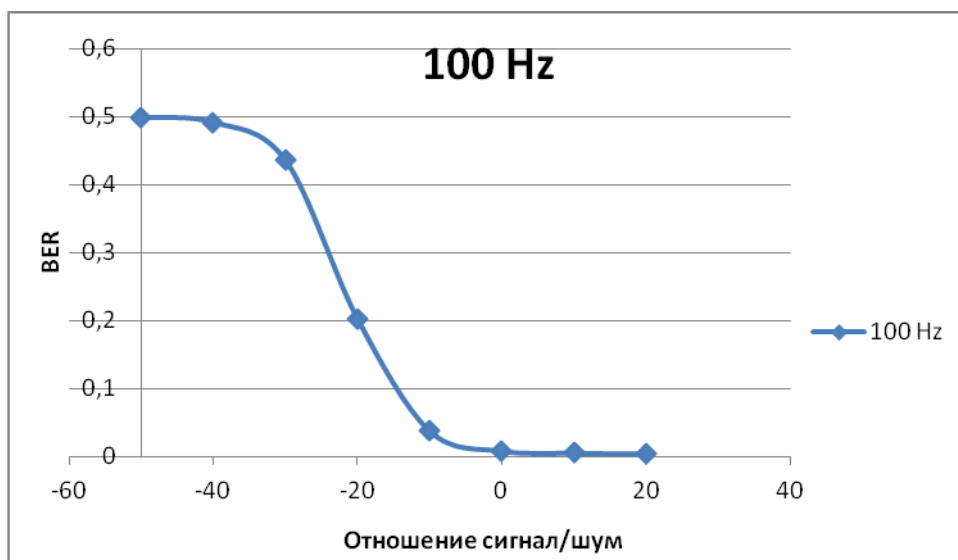


Рис. 3.13. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 100 Гц

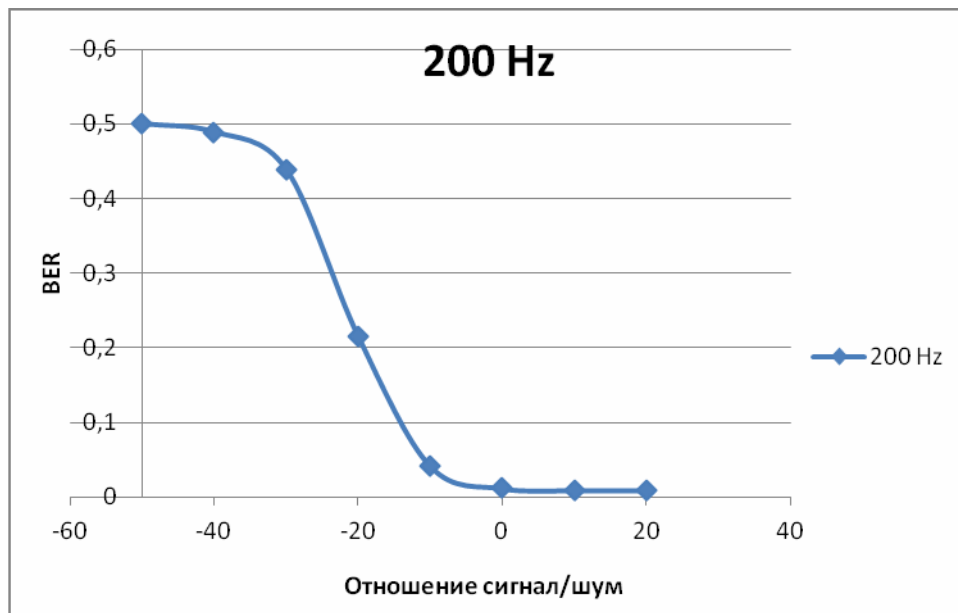


Рис. 3.14. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 200 Гц

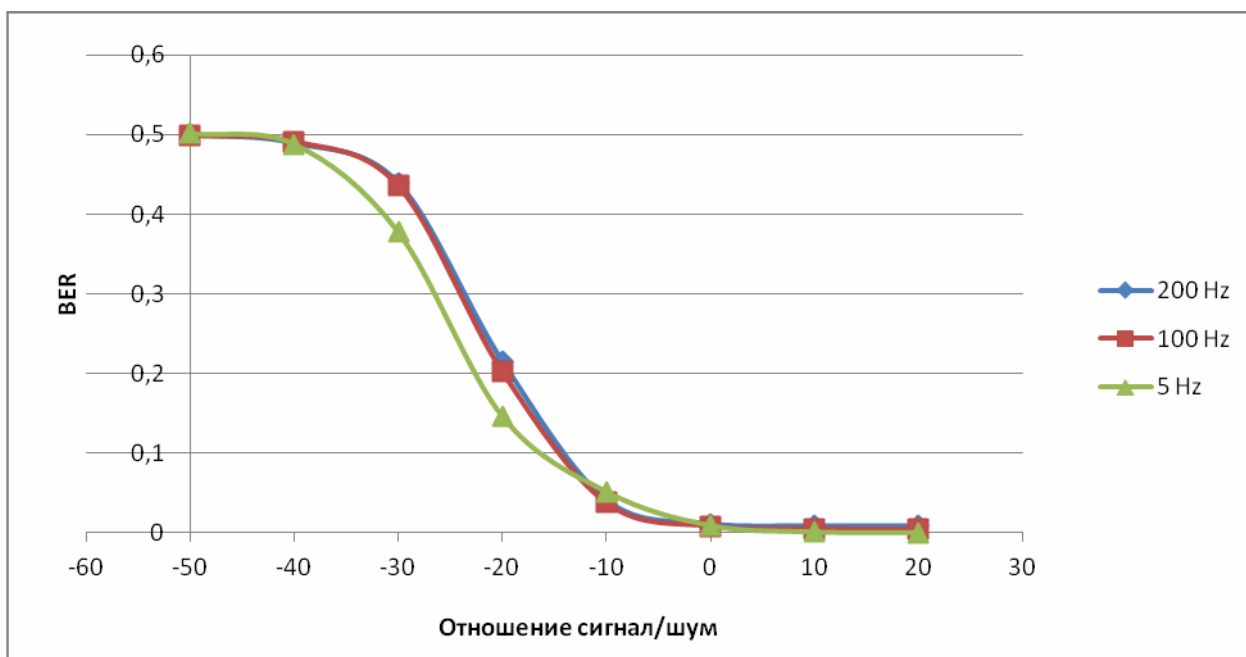


Рис. 3.15. Зависимость BER от отношения сигнал/шум при доплеровском сдвиге 5, 100, 200 Гц

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.

#### 4.СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА CDMA

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), BANM (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 обеспечивает 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 радиоинтерфейса 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 GPRS, 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 CDMA. 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.

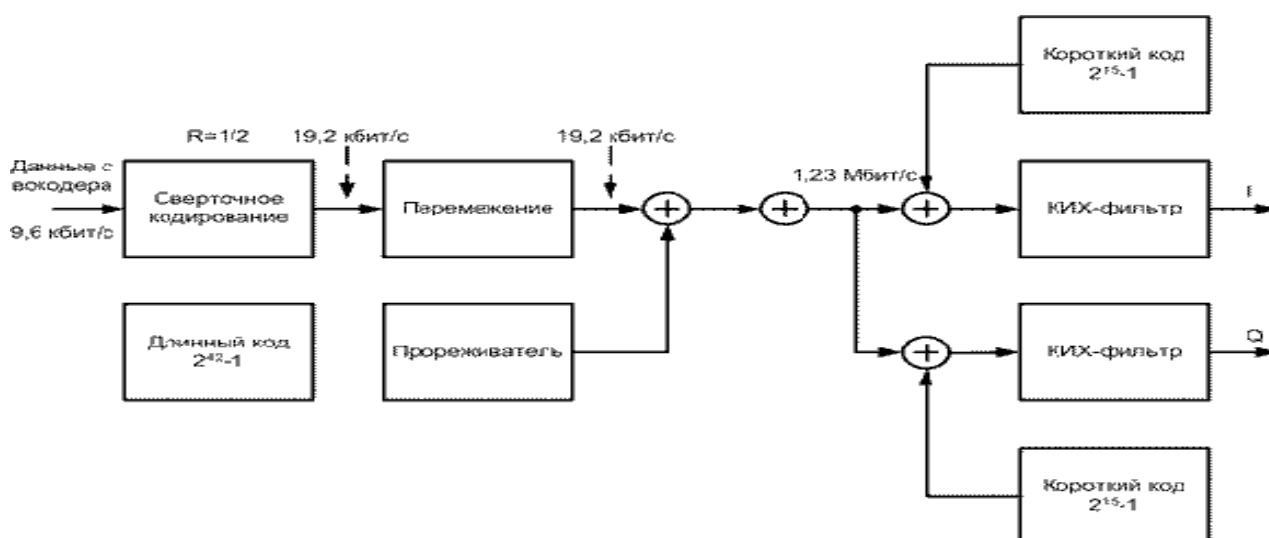


Рис. 4.16. Схема кодирования в прямом канале

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.

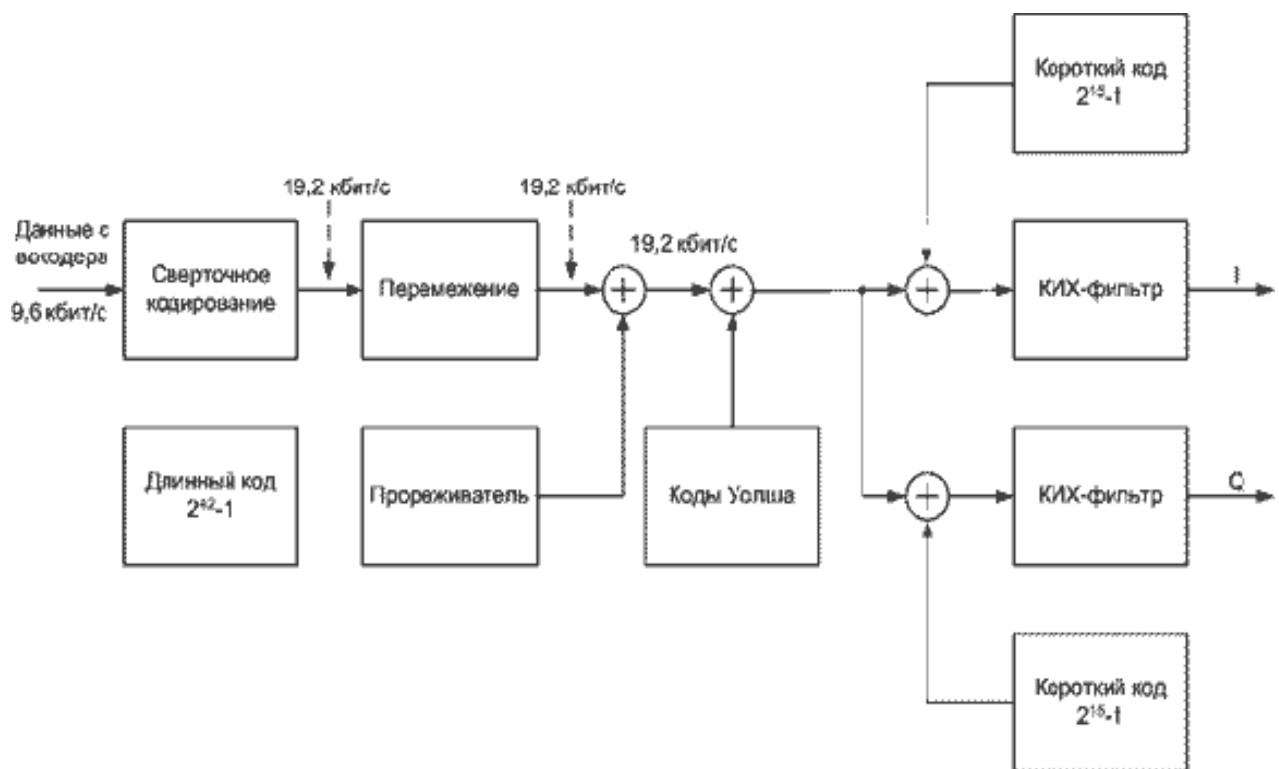


Рис. 4.17. Схема кодирования в обратном канале.

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. 4.18. 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.

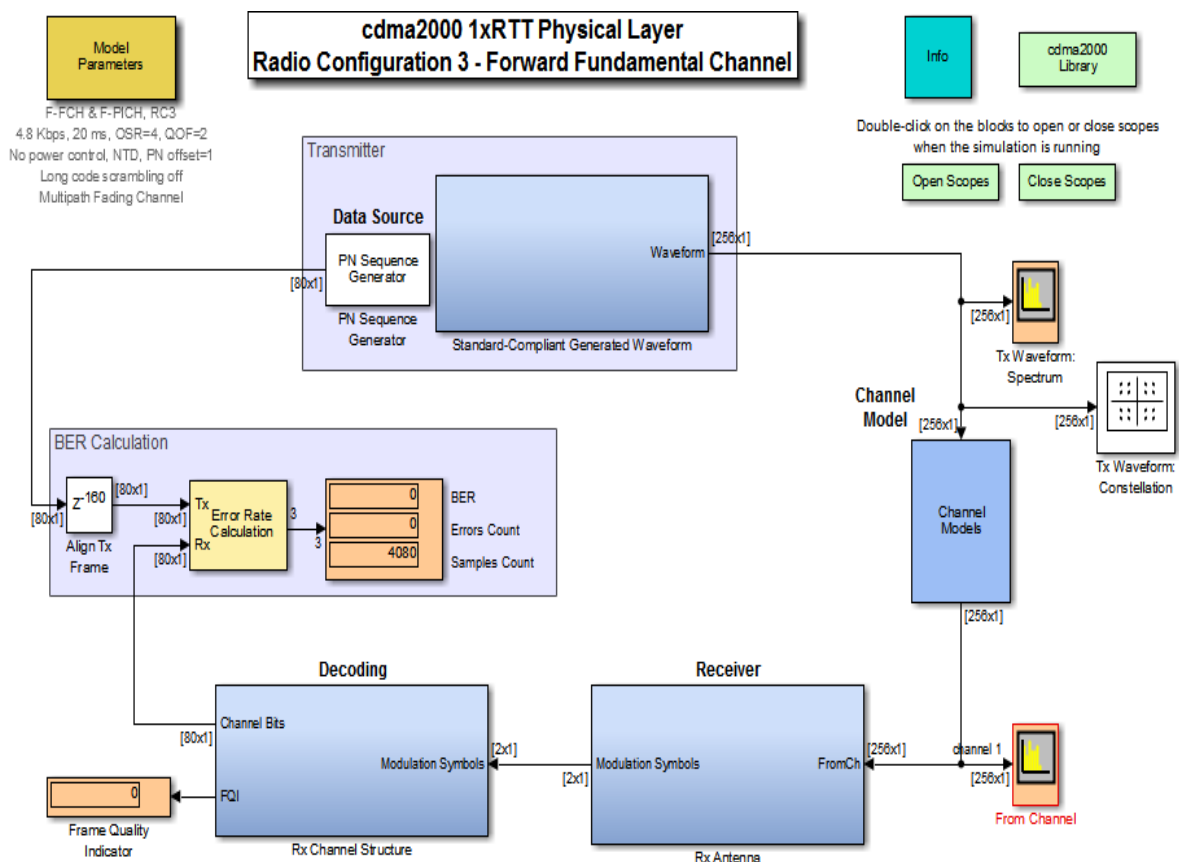


Рис.4.19. Модель CDMA2000 1xRTT в MATLAB R2015b



Развернутая модель передатчика представлена на рисунке 4.20.

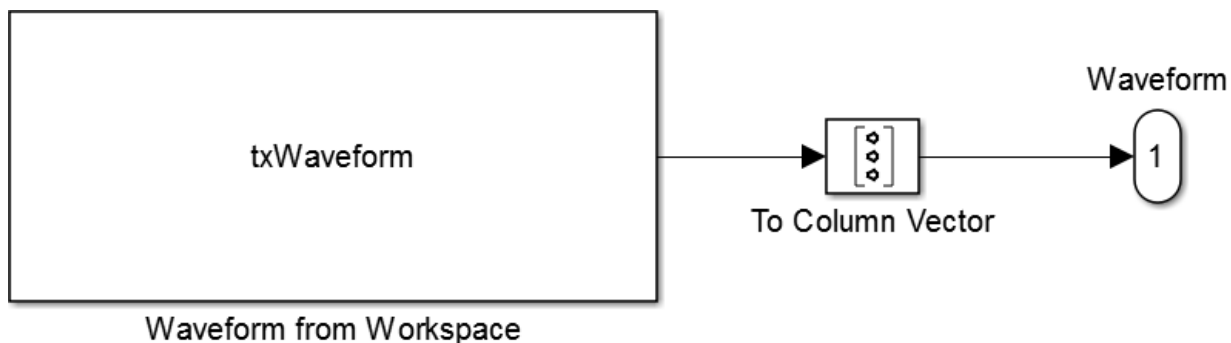


Рис. 4.20. Модель передатчика

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.

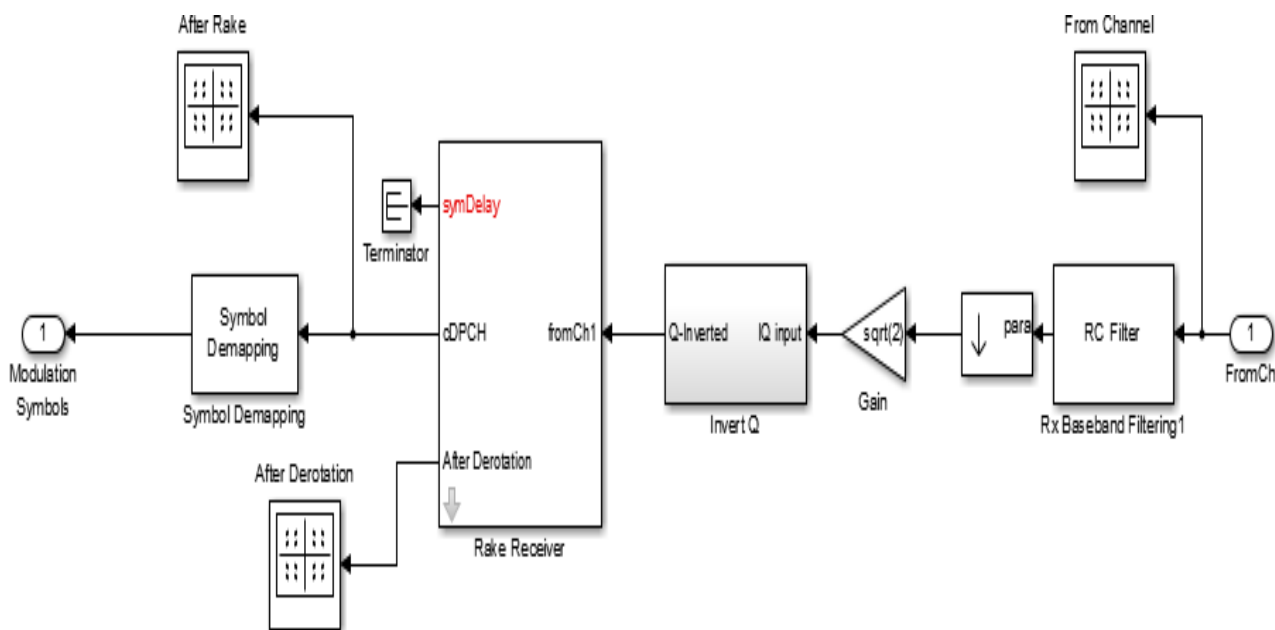


Рис. 4.21. Модель приемника.

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.

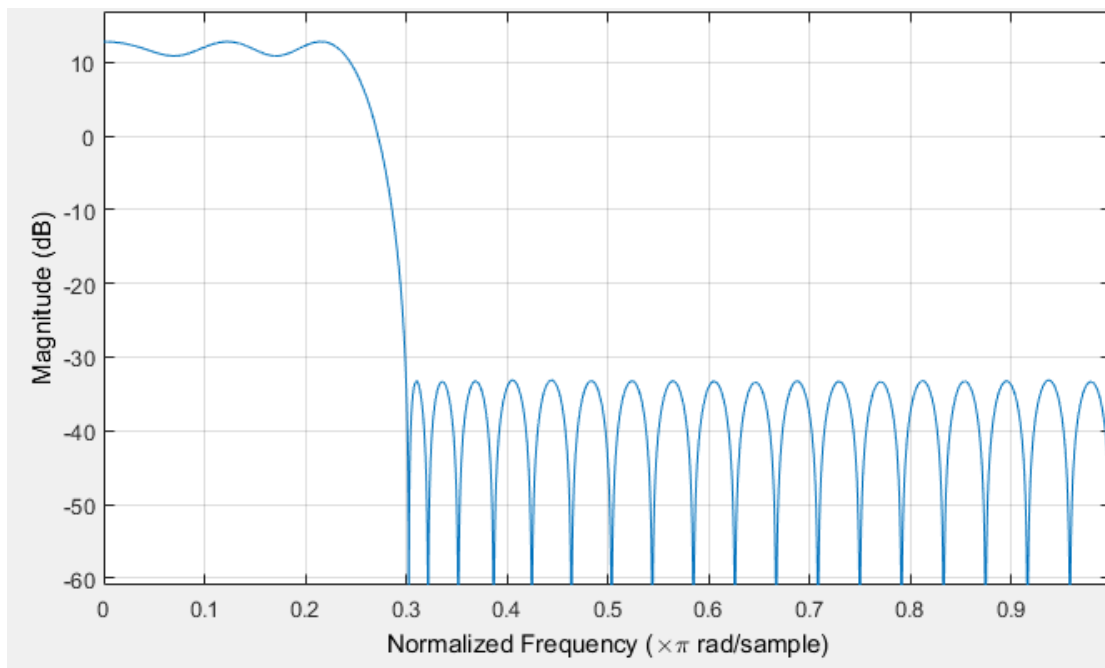


Рис. 4.22. АЧХ фильтра приемника

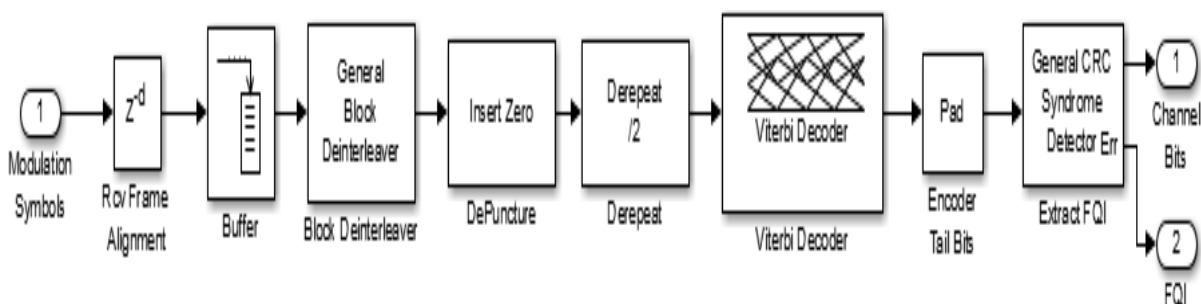


Рис. 4.23. Модель декодера.

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:

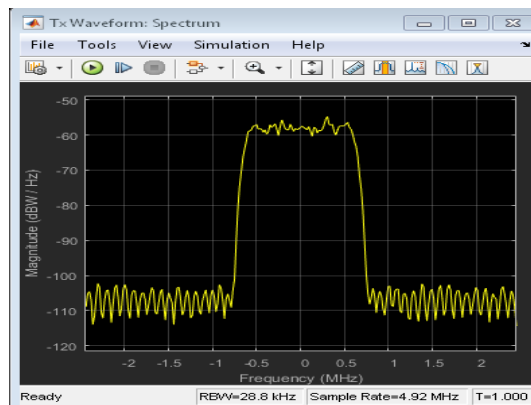


Рис. 4.24. Спектр сигнала сгенерированного базовой станцией.

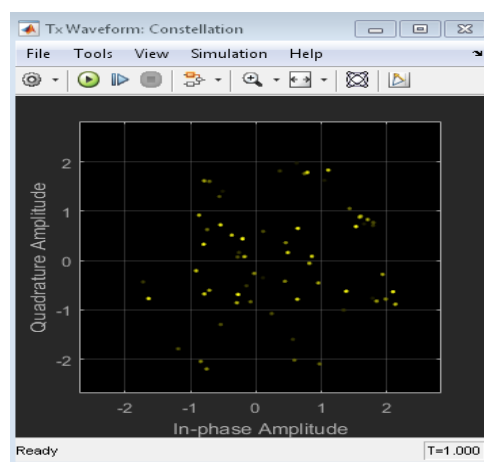


Рис. 4.25. Сгенерированный базовой станцией сигнал на I-Q диаграмме

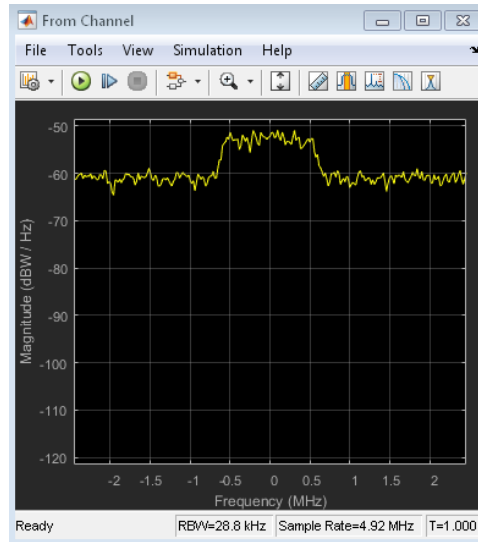


Рис. 4.26. Спектр принимаемого мобильной станцией сигнала после прохождения через канал.

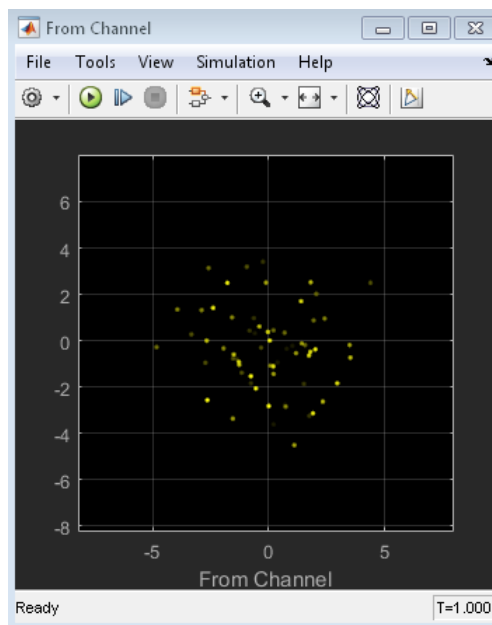


Рис. 4.27. Сигнал принимаемый мобильной станцией после прохождения через канал на I-Q диаграмме.

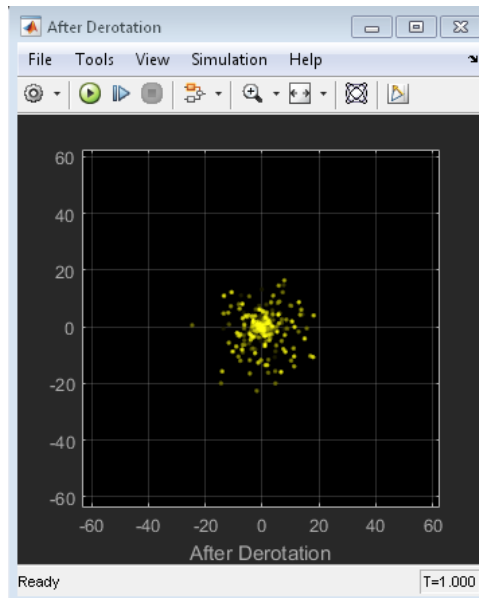


Рис. 4.28. Сигнал, принятый мобильной станцией

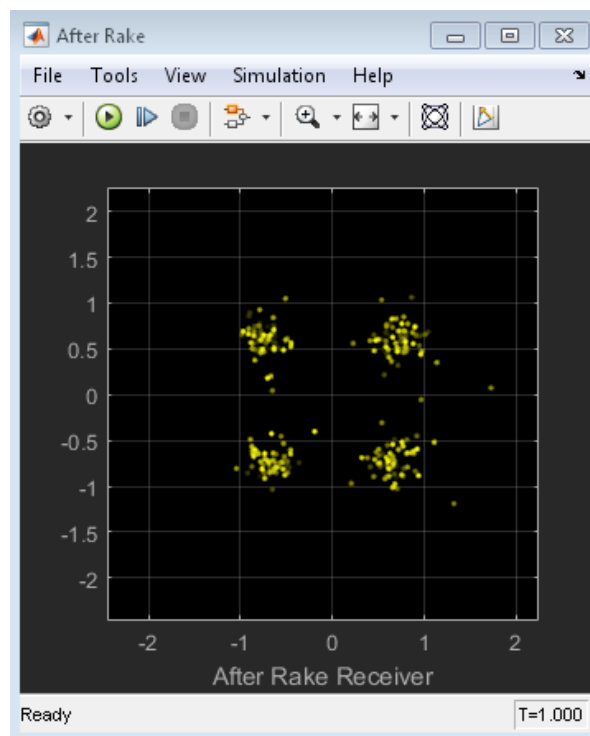


Рис. 4.29. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме.

### Исследование модели

В блоке Model Parameters во вкладке Channel Settings выберем Channel Model: No Channel.

Результат моделирования:

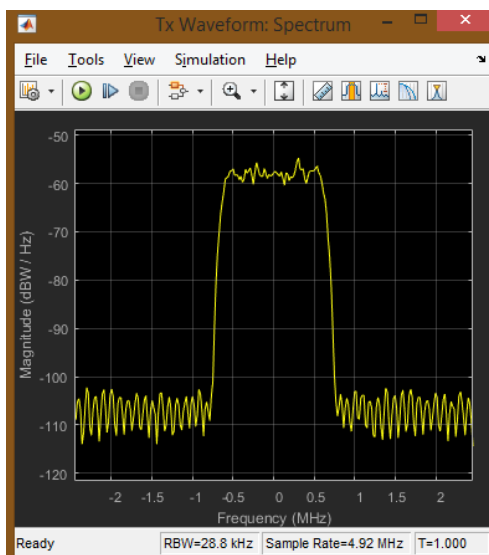


Рис. 4.30. Спектр сигнала сгенерированного базовой станцией

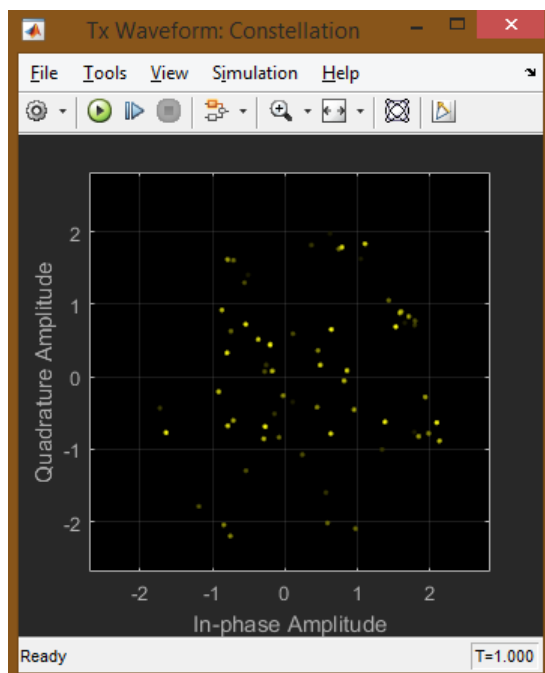


Рис. 4.31. Сгенерированный базовой станцией сигнал на I-Q диаграмме.

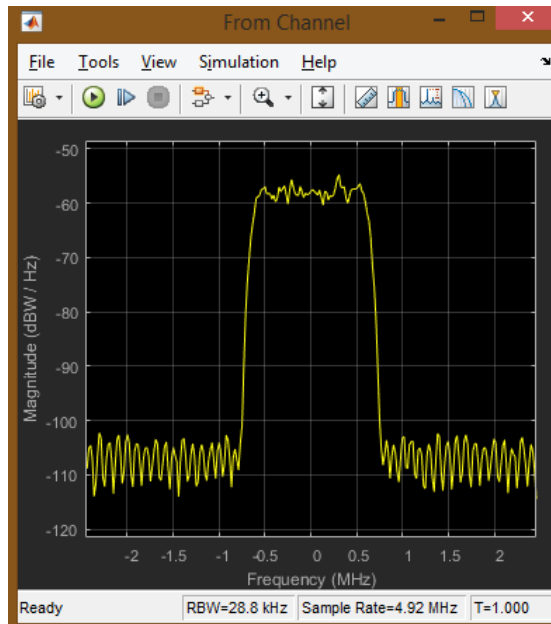


Рис. 4.32. Спектр сигнала после канала

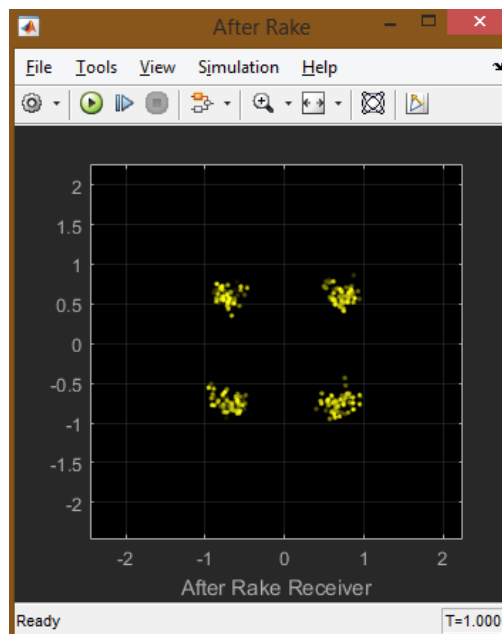


Рис. 4.33. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме

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.

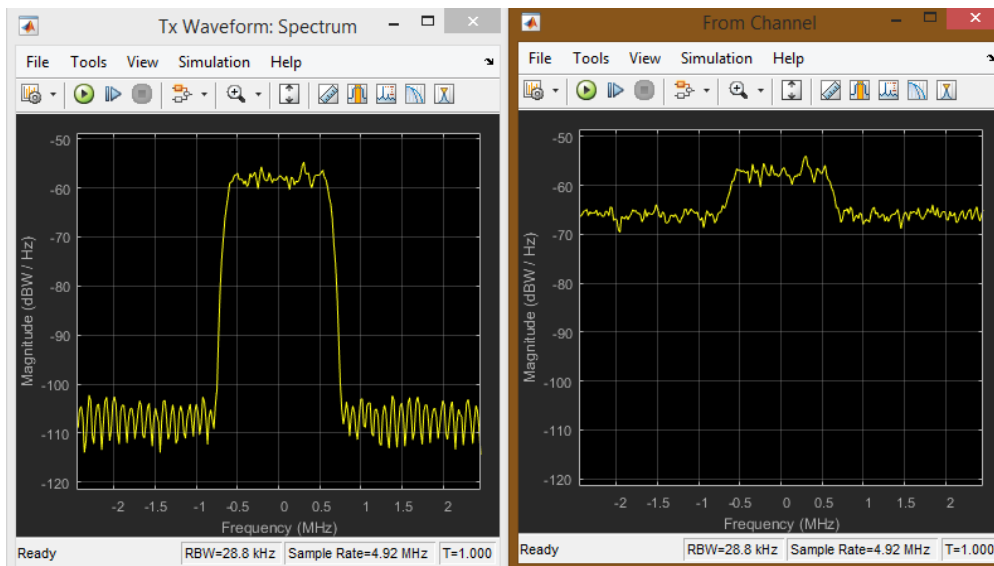


Рис. 4.34. Спектр сигнала до и после канала при отношении сигнал/шум 5 дБ

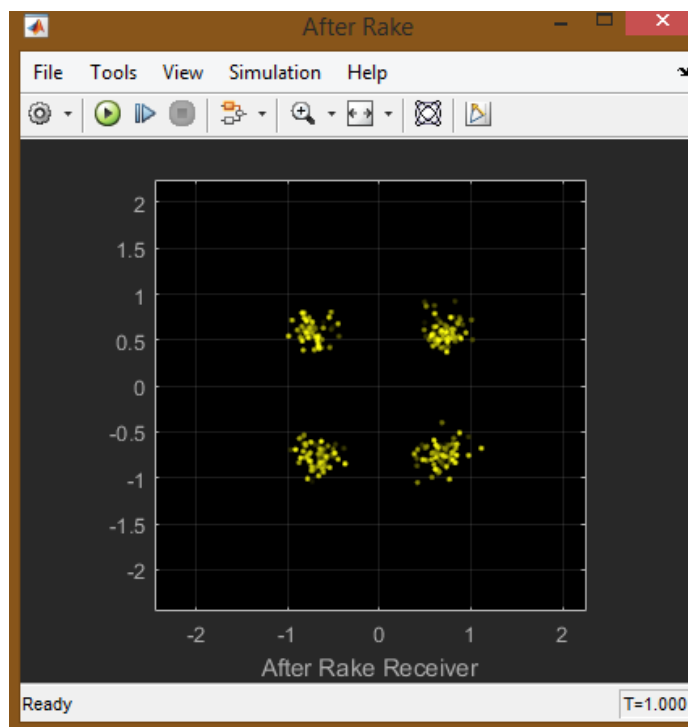


Рис. 4.35. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме.



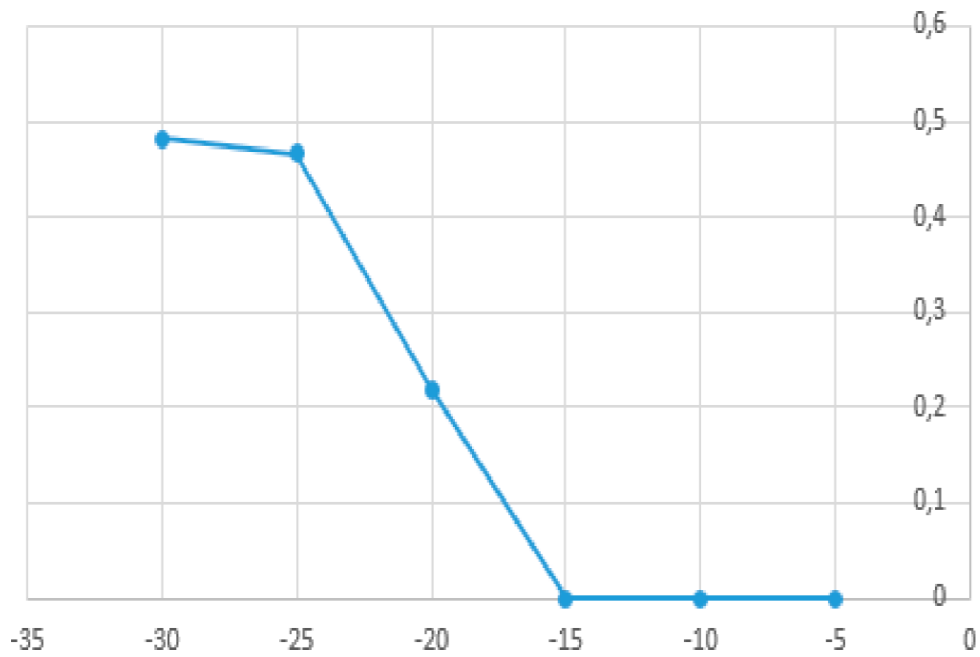


Рис. 4.36. Зависимость BER от SNR в канале с шумами.

Таблица 4.1. 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):

Multipath Profile - Delay Vector (s):

Multipath Profile - Gain Vector (dB):

Рис. 4.37. Заданные параметры канала с многолучевым распространением.

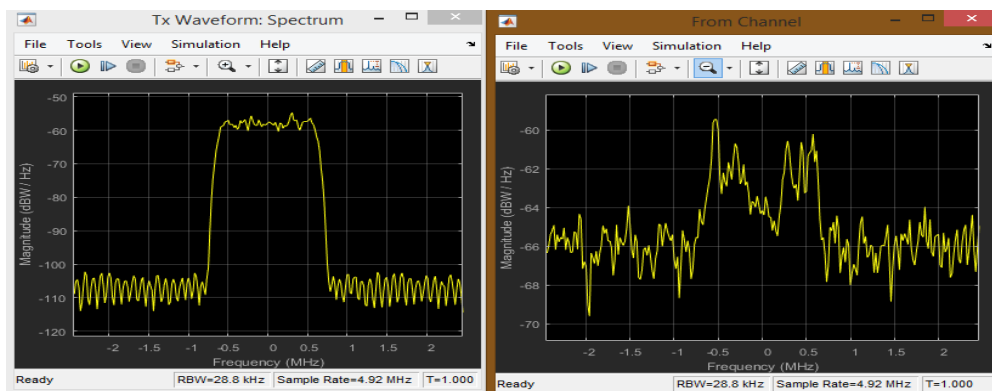


Рис. 4.38. Спектры сигнала до и после канала при отношении сигнал/шум 5 дБ.

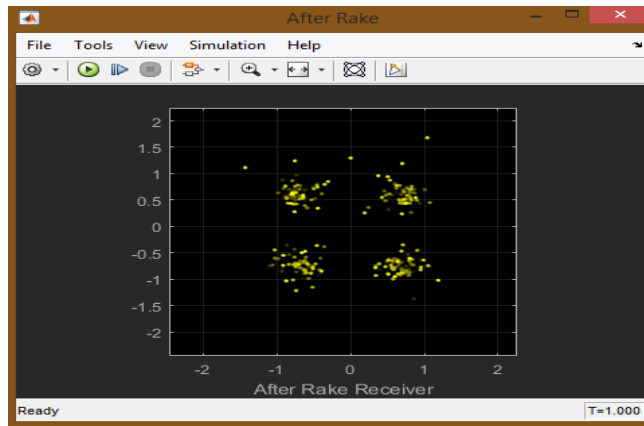


Рис. 4.39. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме.

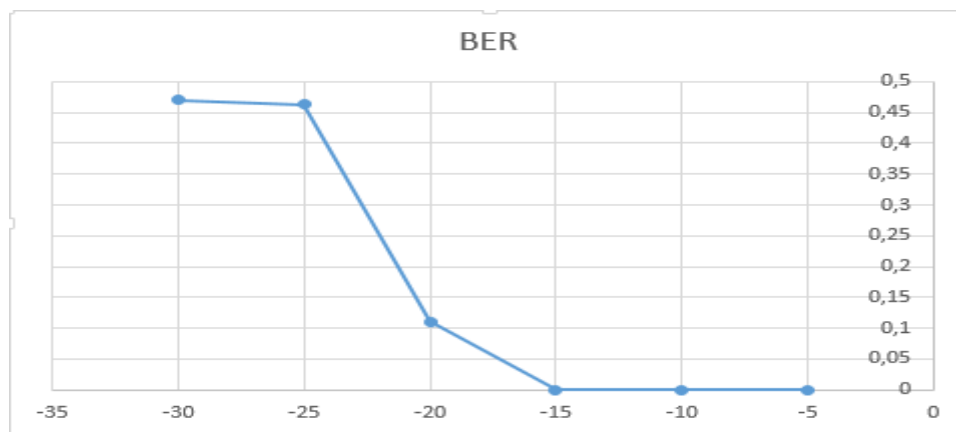


Рис. 4.40. Зависимость BER от SNR в канале с многолучевым распространением.

Таблица 4.2. 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. 4.41. Заданные параметры канала с многолучевым распространением

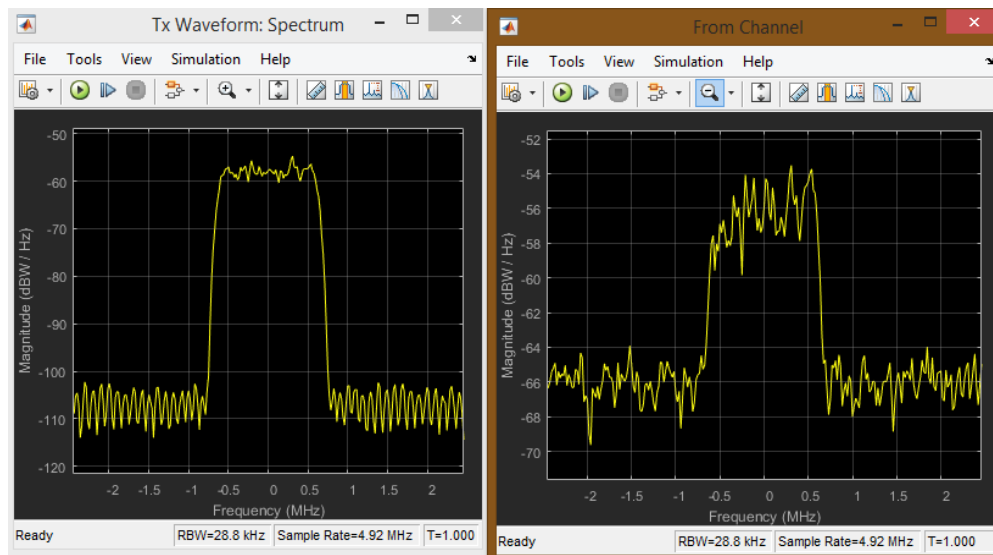


Рис. 4.42. Спектры сигнала до и после канала при отношении сигнал/шум 5 дБ

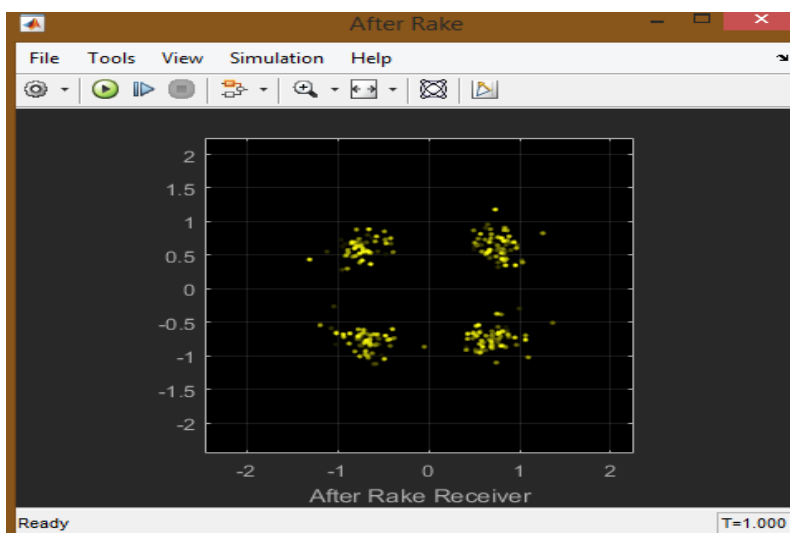


Рис. 4.43. Сигнал, декодированный мобильной станцией, на I-Q диаграмме

Таблица 4.3. 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

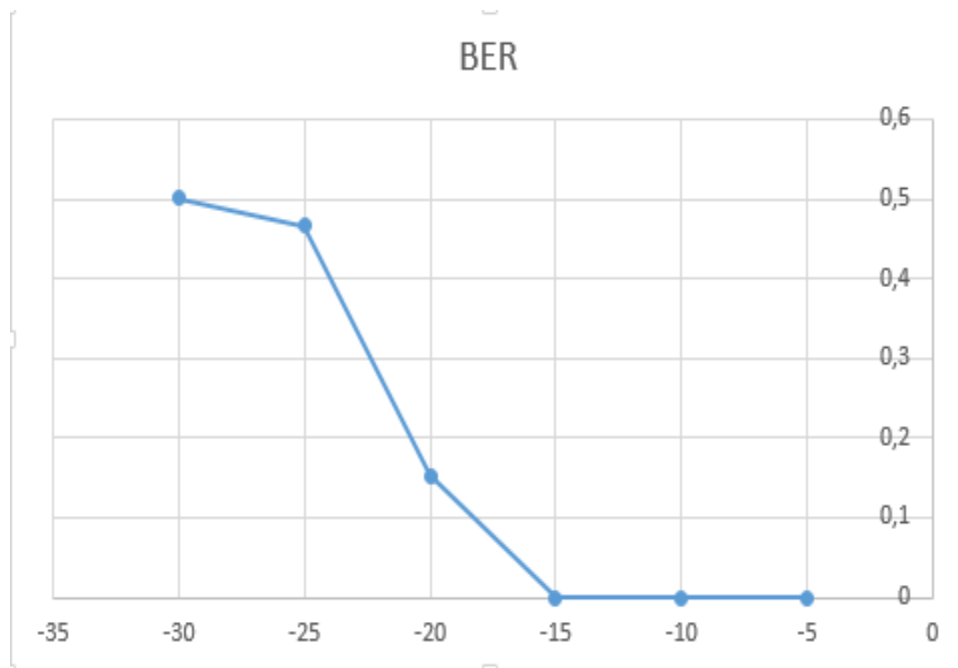


Рис. 4.44. Зависимость BER от SNR в канале с многолучевым распространением

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 скрытым, 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 4.4. 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

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. СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА IEEE 802.11 (WIFI)

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.

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.

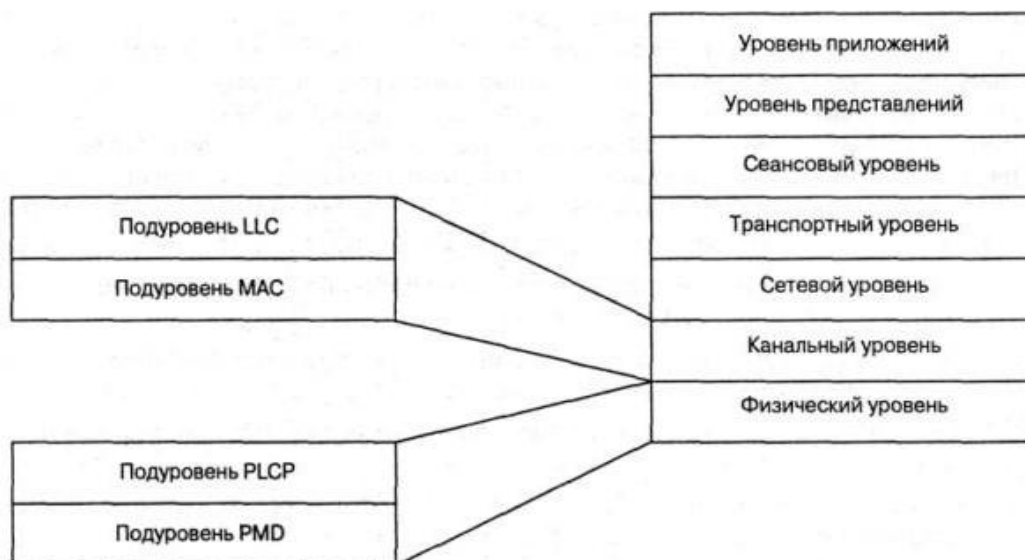


Рис. 5.1. Подуровни уровня PHY

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 5.1 - 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.

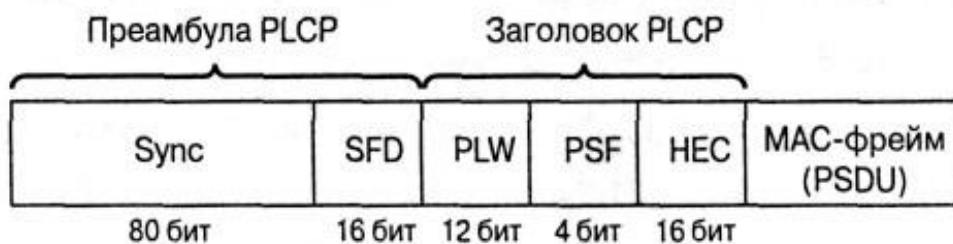


Рис. 5.2. Формат фрейма FHSS подуровня PLCP

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.

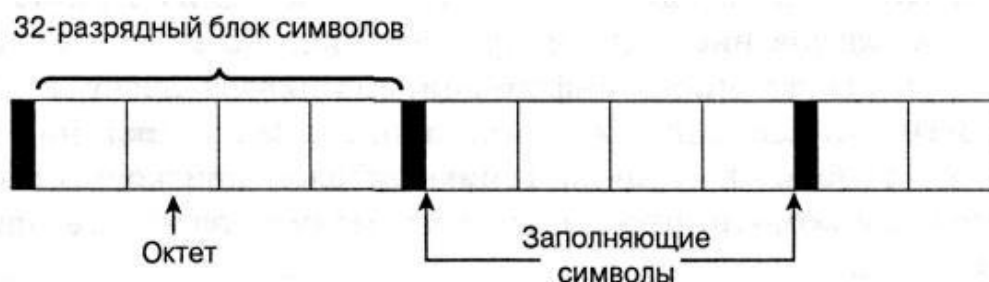


Рис. 5.2. Скремблированный PSDU в технологии FHSS

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 PPDU: преамбулу PLCP и заголовок PLCP. Формат фрейма представлен на рис.5.3.



Рис. 5.3. 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.

### IEEE 802.11b

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. 5.4. Структура кадров сети IEEE 802.11b физического уровня

В стандарте IEEE 802.11b предусмотрено два типа заголовков: длинный и короткий (51).



Рис. 5.5. 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 6, где  $\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8\}$  представляют чипы последовательности. В таблицн 6  $j$  представляет мнимое число, корень квадратный из -1, и откладывается по мнимой, или квадратурной, оси комплексной плоскости.

(b2, b3)	C8						
	1	2	3	4	5	6	7
00				1			1
01							1



	j	1	j				j	
10								1
	j		j	1	j			
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 5.3. 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.

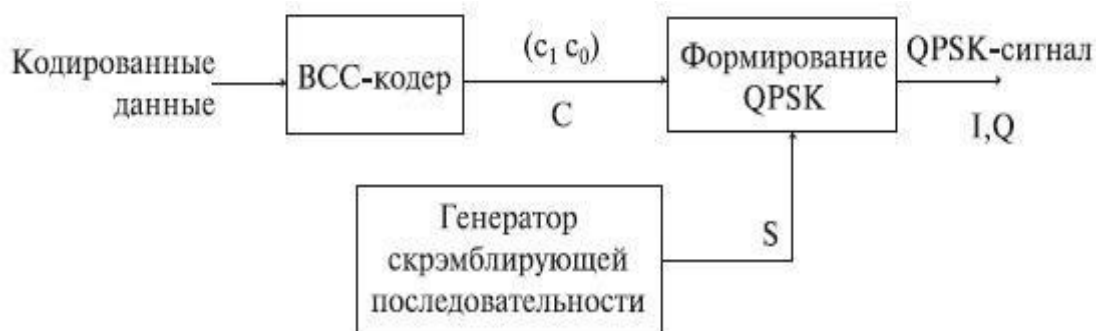


Рис. 5.6. Общая схема PBCC-модуляции

Как следует из названия, метод основан на сверточном кодировании. Для скоростей 5,5 и 11 Мбит/с поток информационных битов поступает в шестиразрядный сдвиговый 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 скрэмблирование. 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.

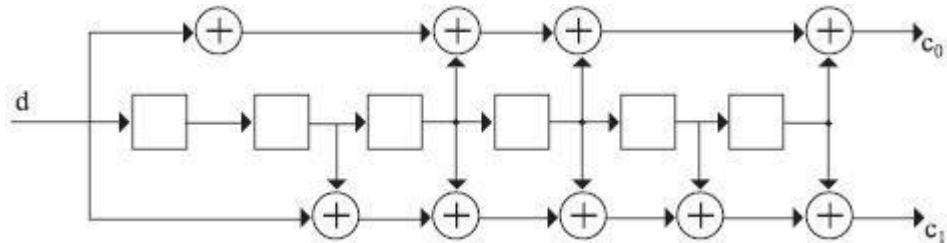


Рис. 5.7. Сверточное кодирование с двумя битами кодовой последовательности

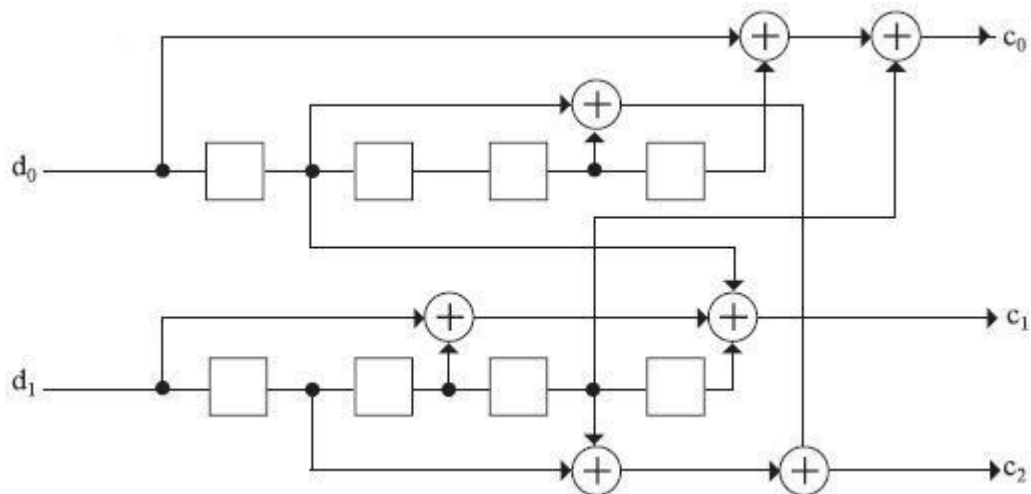


Рис. 5.8. Сверточное кодирование с тремя битами кодовой последовательности

У шестиразрядного 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 5.4 показано, как необходимая скорость передачи данных преобразуется в соответствующие параметры узлов передатчика OFDM.

Таблица 5.4. Параметры передатчика стандарта 802.11a

Скорость передачи данных (Мбит/с)	Модуляция	Скорость сверточного кодирования	Число канальных битов 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.5.9).

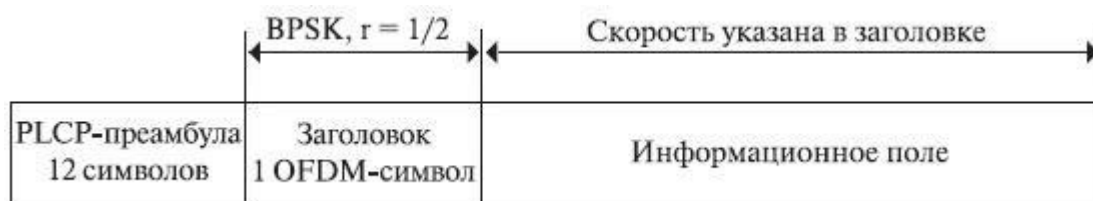


Рис. 5.9. Структура заголовка физического уровня стандарта IEEE 802.11a

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.

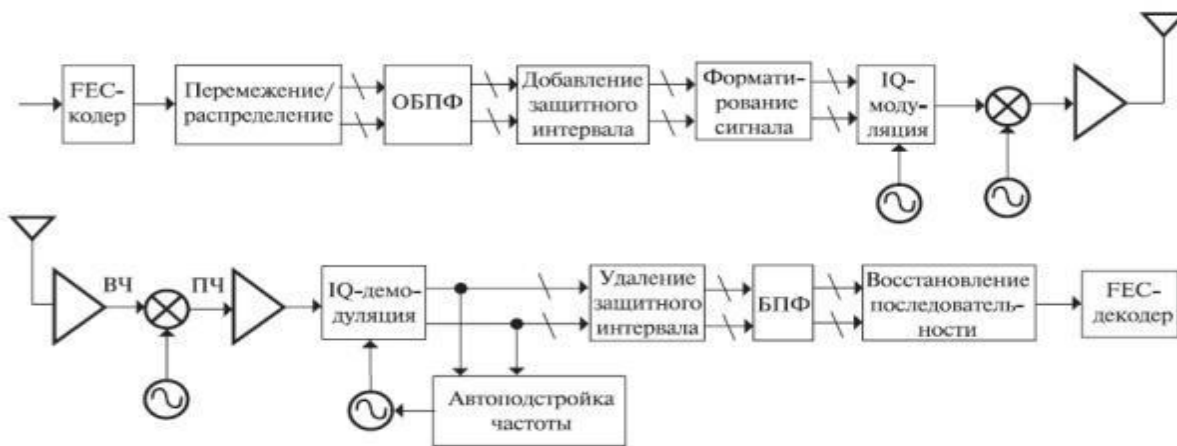


Рис. 5.10. Функциональная схема трактов приема/передачи стандарта IEEE 802.11a

### 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.5.11).



Рис. 5.11. 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 CCK, 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 5.9, зависимость скорости от типа модуляции - на рис.5.12.

Скорость, Мбит/с	Тип модуляции	
	Обязательно	Допустимо
1	Последовательность Баркера	
2	Последовательность Баркера	
5,5	CCK	PBCC
6	OFDM	OFDM
9		OFDM, CCK-OFDM
11	CCK	PBCC
12	OFDM	CCK-OFDM
18		OFDM, CCK-OFDM
22		PBCC
24	OFDM	CCK-OFDM
33		PBCC
36		OFDM, CCK-OFDM
48		OFDM, CCK-OFDM
54		OFDM, CCK-OFDM

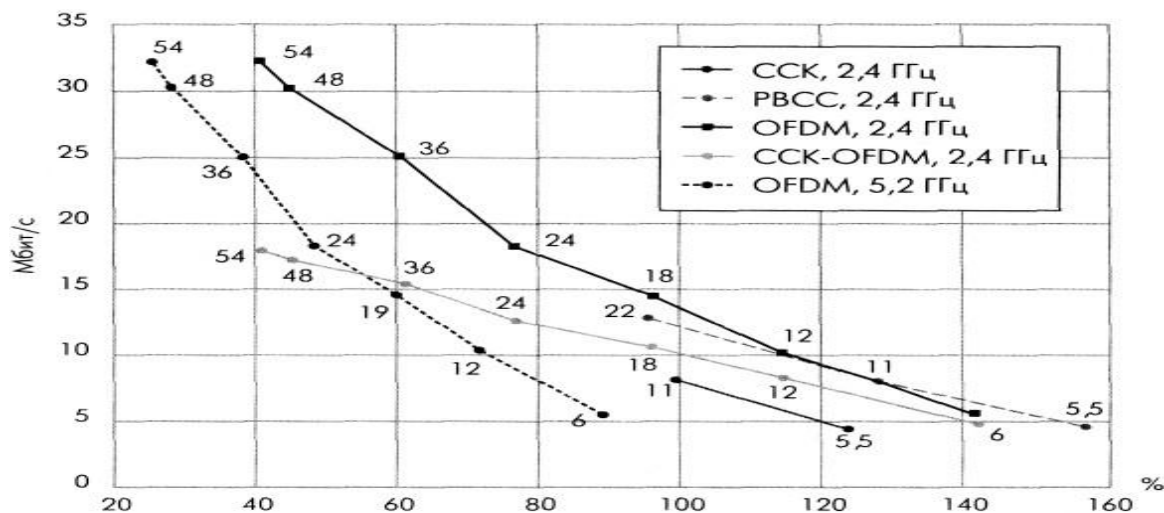


Рис. 5.12. Зависимость скорости передачи от расстояния для различных технологий передачи. Расстояние приведено в процентах, 100% - дальность передачи с модуляцией CCK на скорости 11 Мбит/с

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 CCK, который обязаны понимать все устройства. Однако защитный механизм существенно снижает пропускную способность сети.



Таблица 5.6. 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	CCK	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.5.13.

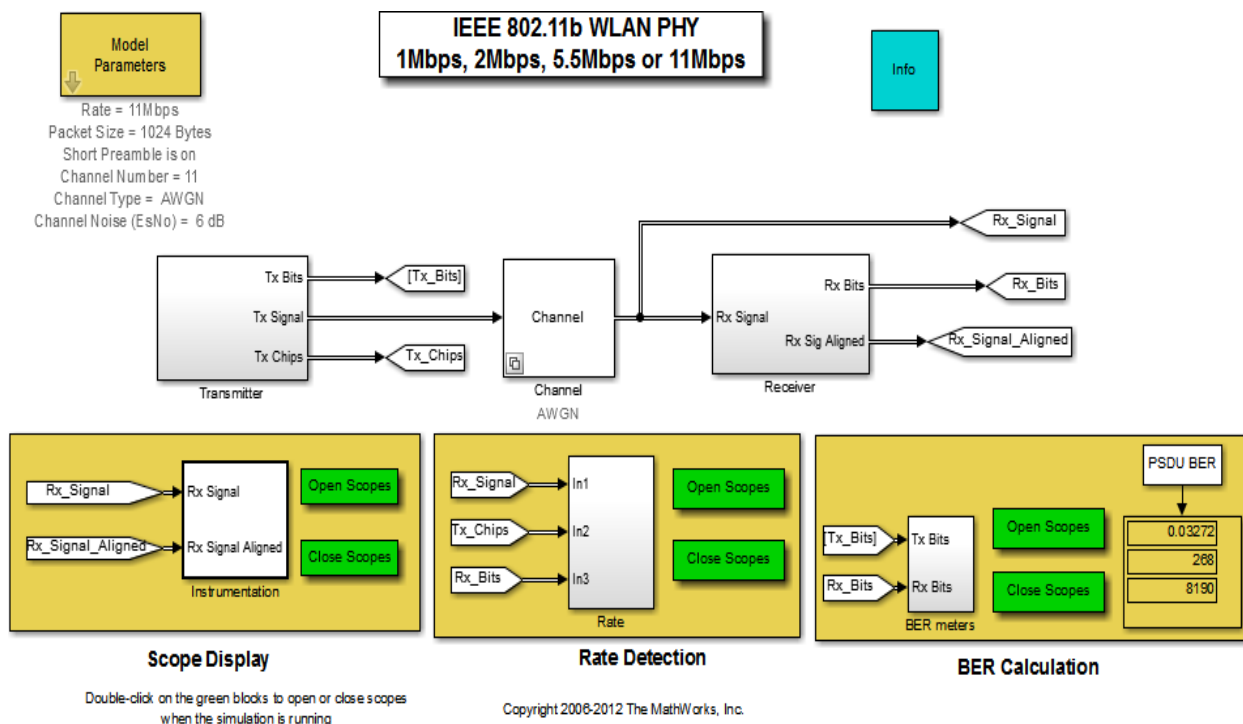


Рис. 5.13. Модель радиointерфейса 802.11b Simulink MATLAB 2015b

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.

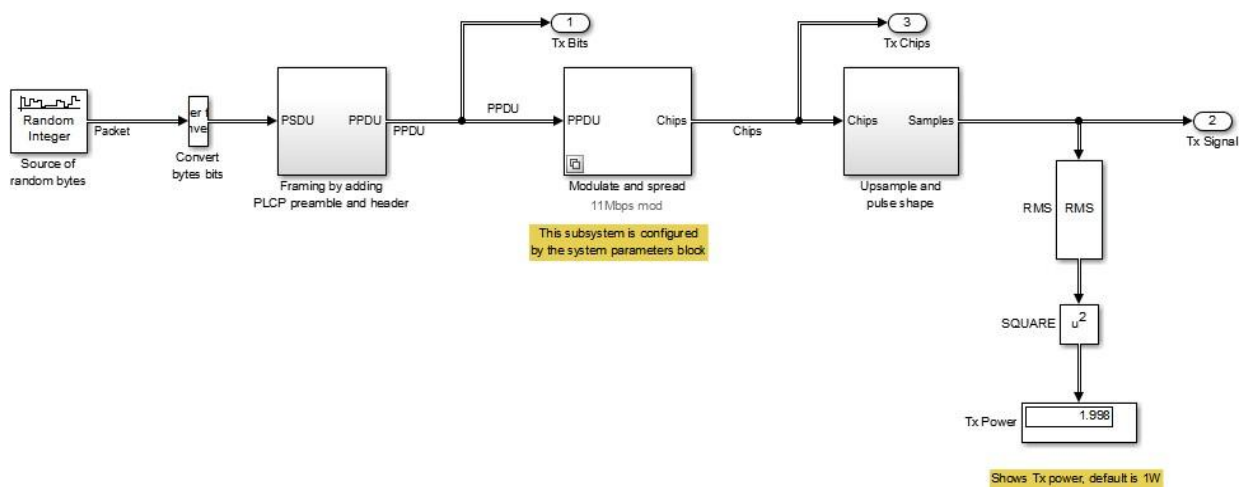


Рис. 5.14. Структурная схема передатчика IEEE 802.11b

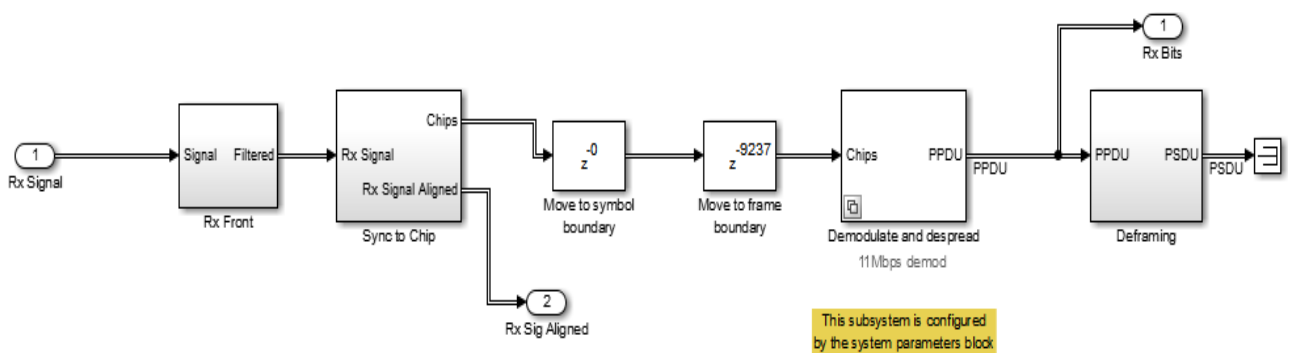


Рис. 5.15. Структурная схема приемника IEEE 802.11b

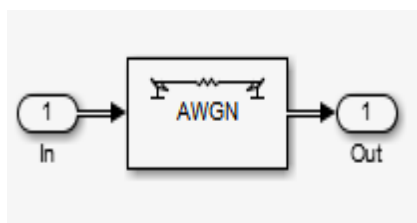


Рис. 5.16. Структурная схема канала передачи IEEE 802.11b

Пример частотной характеристика представлен на рис.5.17, а диаграмма созвездий на рис.5.18.

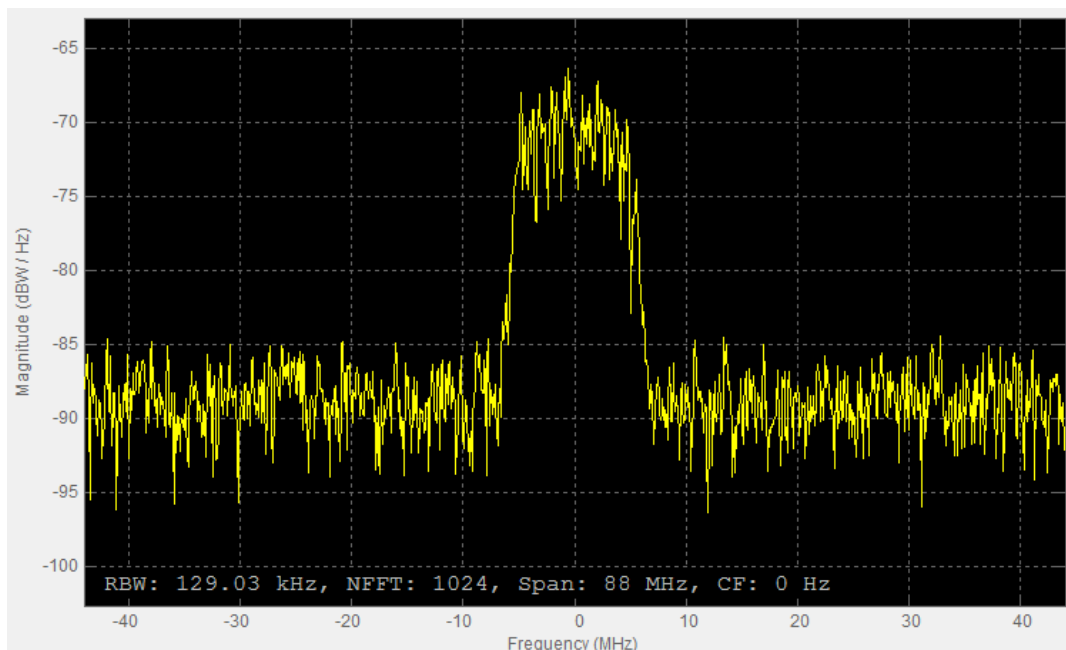


Рис. 5.17. Частотная характеристика для скорости передачи 11 Мбит/с

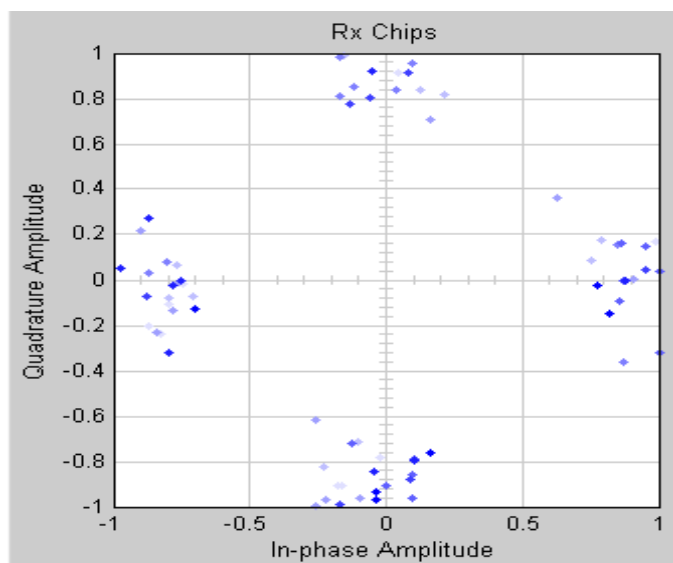


Рис. 5.18. Диаграмма созвездий для скорости передачи 11 Мбит/с

### 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 визменять 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.5.19.

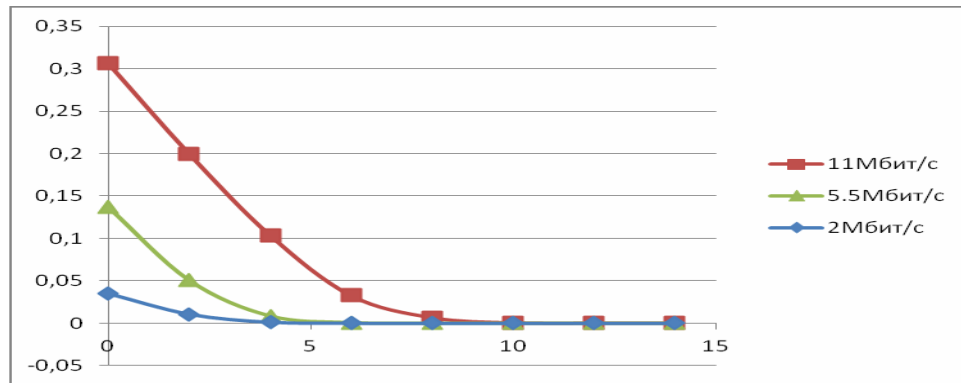


Рис. 5.19. Зависимость ошибки BER от отношения сигнал/шум для различных скоростей IEEE 802.11b

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

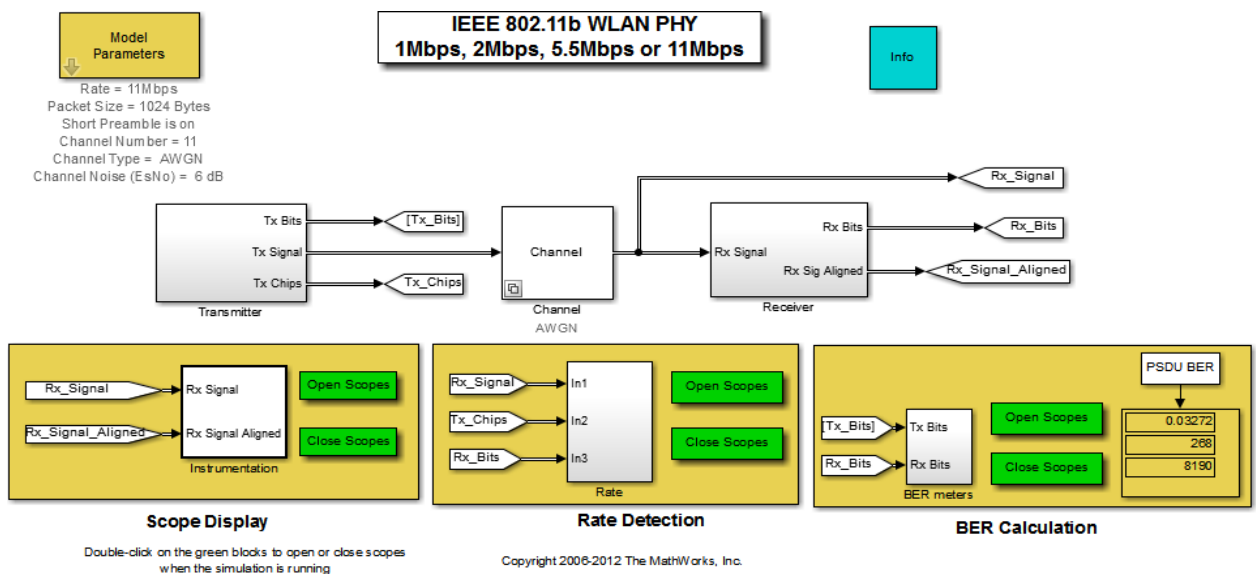


Рис. 5.20. Схем сети IEEE 802.11b MATLAB

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.

## 6. СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА

### IEEE 802.15.4 ZIGBEE

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. 6.1. Основные характеристики популярных стандартов беспроводной связи



Рис. 6.1. 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 малоприспособны 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 5.69.

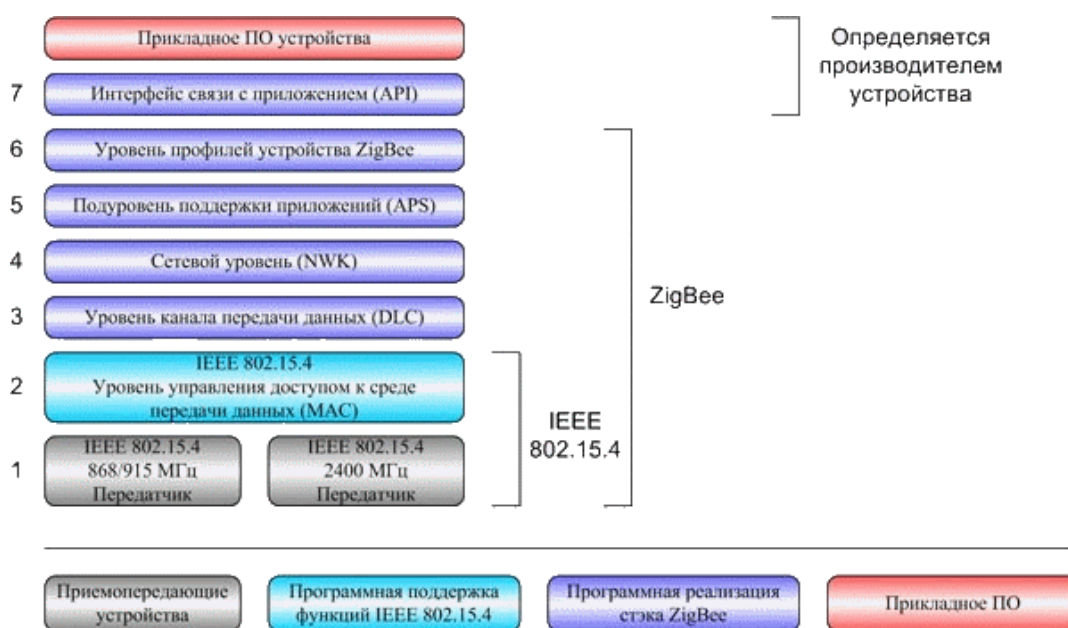


Рис. 6.1. Многоуровневая модель стандарта связи ZigBee

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 6.1. 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.

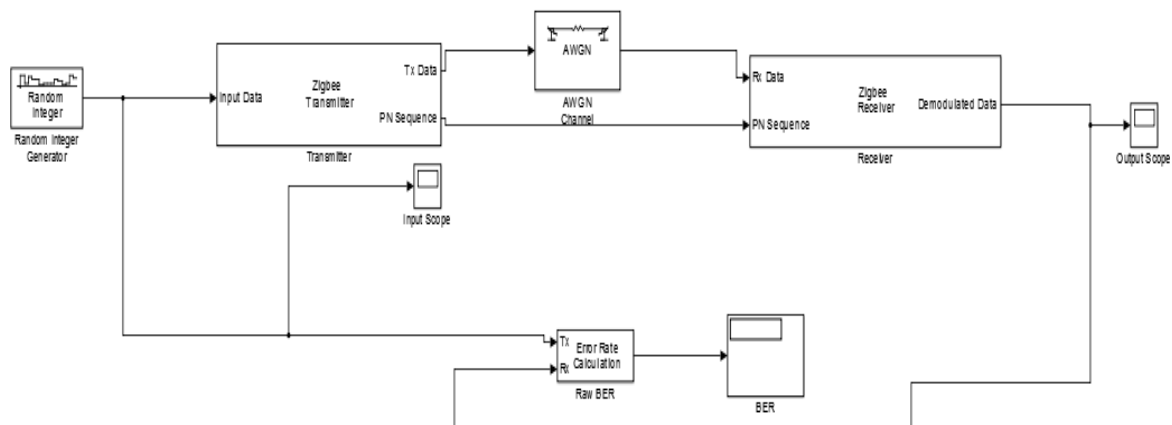


Рис. 6.2. Схема стандарта ZigBee 802.15.4 Simulink MATLAB 2015b

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.

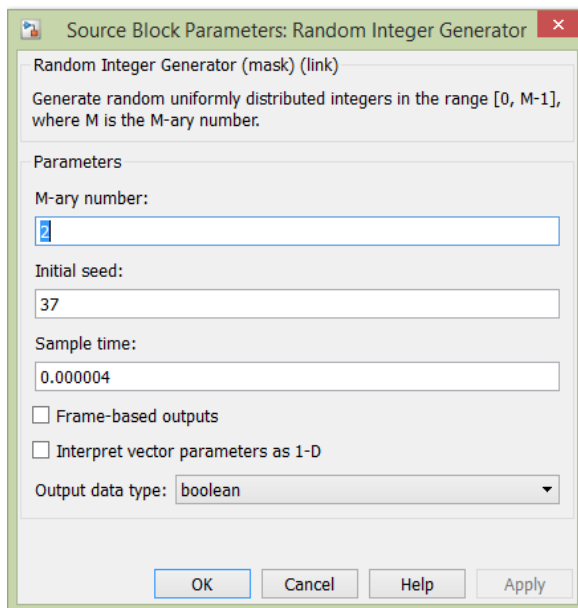


Рис. 6.3. Параметры блока Random Integer Generator

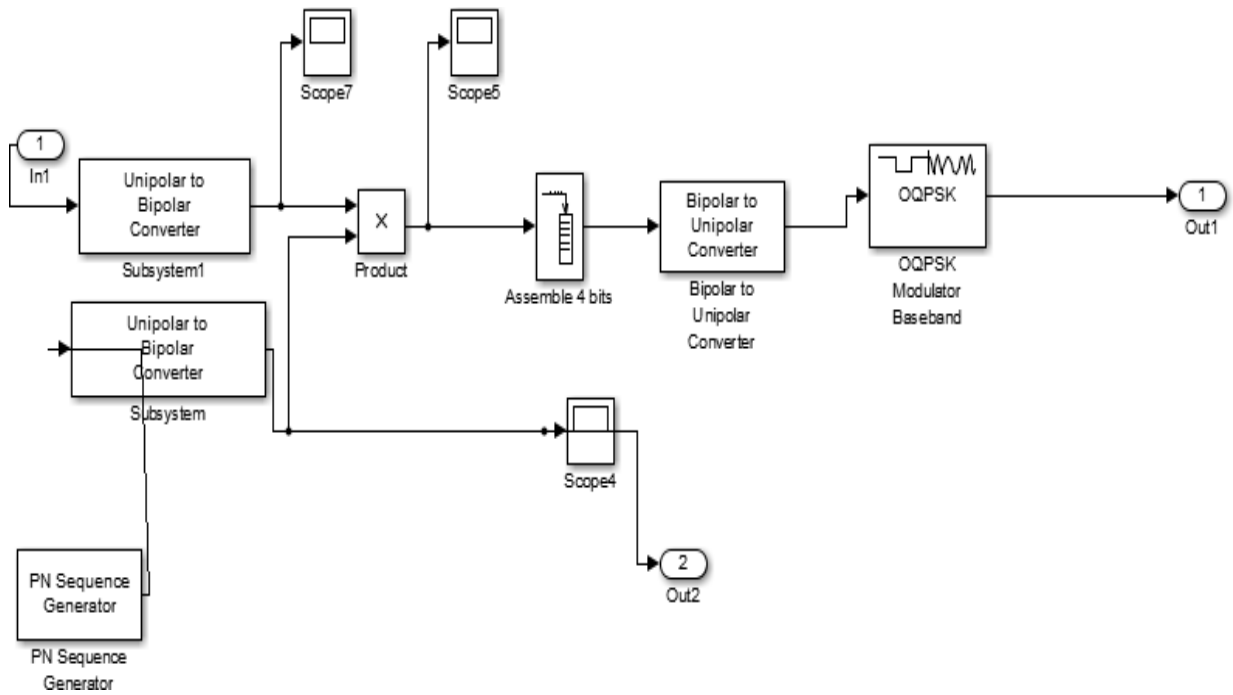


Рис. 6.4. Схема ZigBeeTransmitter

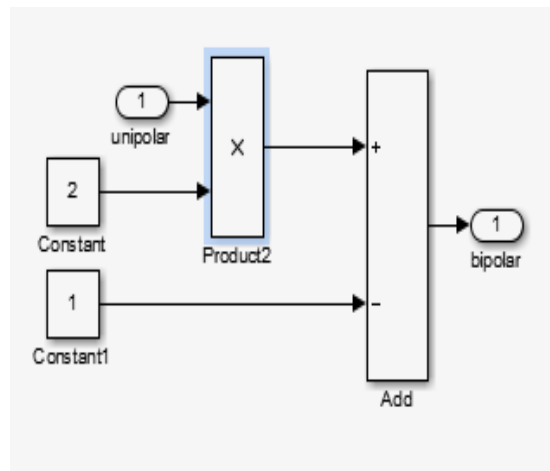


Рис. 6.5. Unipolar to bipolar converter

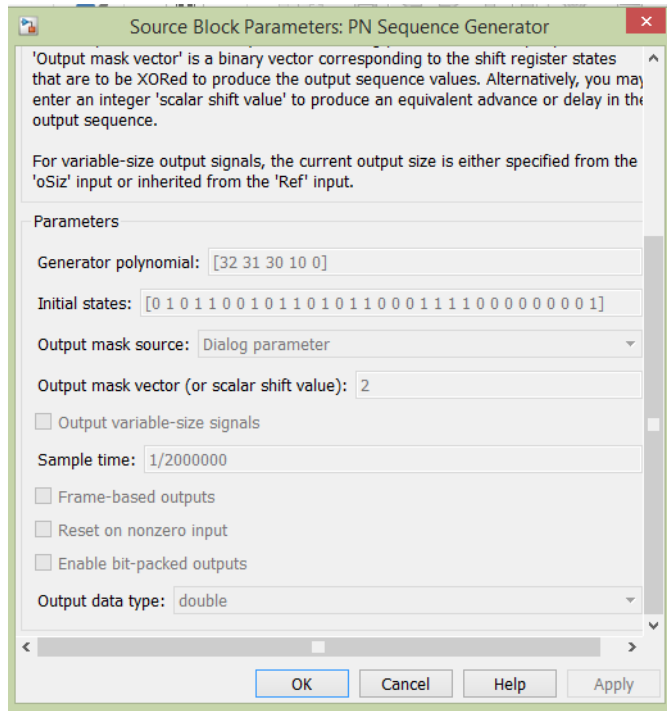


Рис. 6.6. Параметры блока PN sequence generator

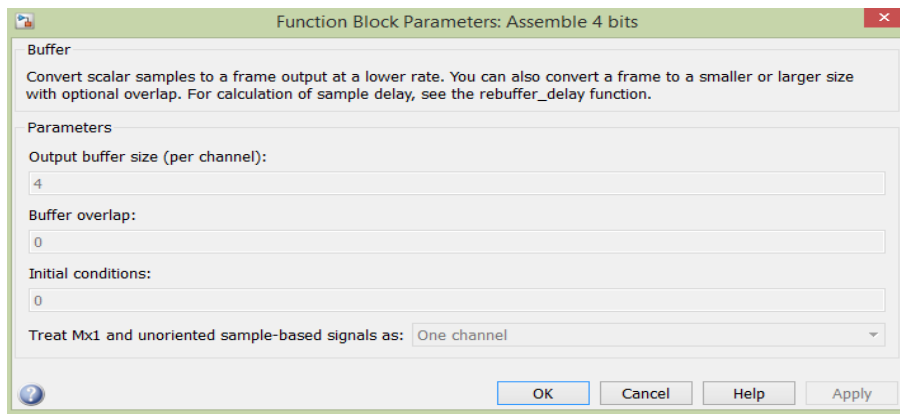


Рис. 6.7. Параметры блока Function block parameters: Assemble 4 bits

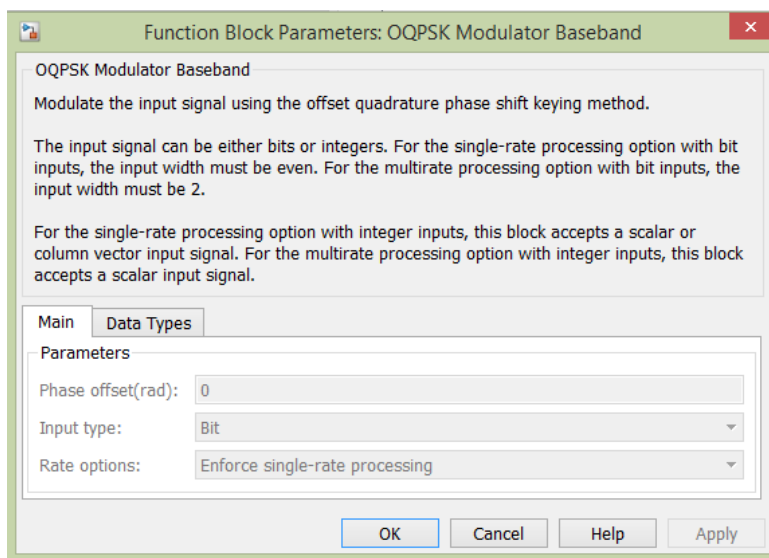


Рис. 6.8. Параметры блока OQPSK modulator baseband

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.

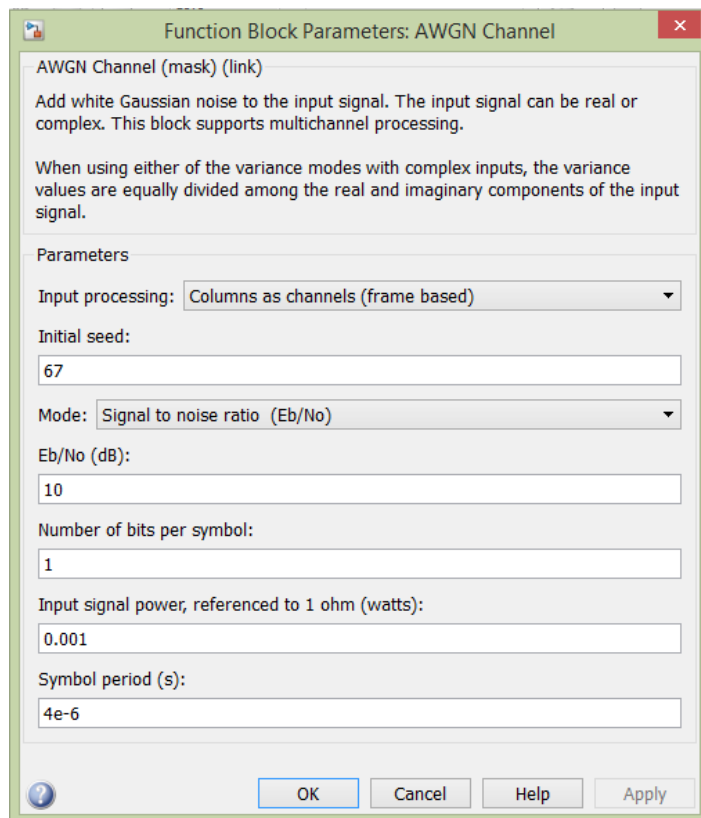


Рис. 6.9. Параметры блока AWGNchannel

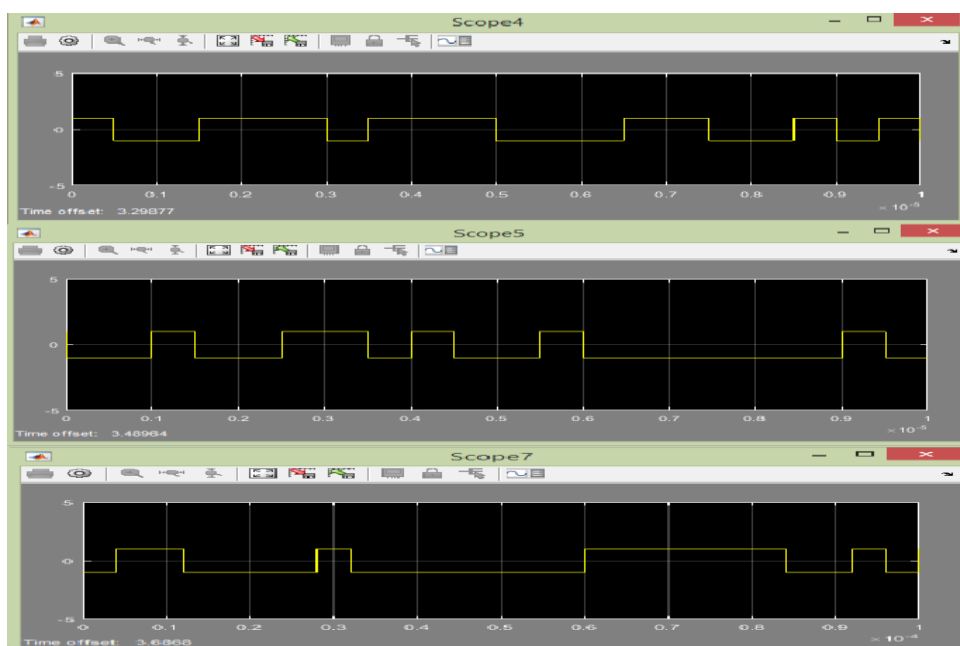


Рис. 6.10. Вид сигнала на осциллографах 4, 5, 7

Рассмотрим подробнее блок ZigBee Receiver.

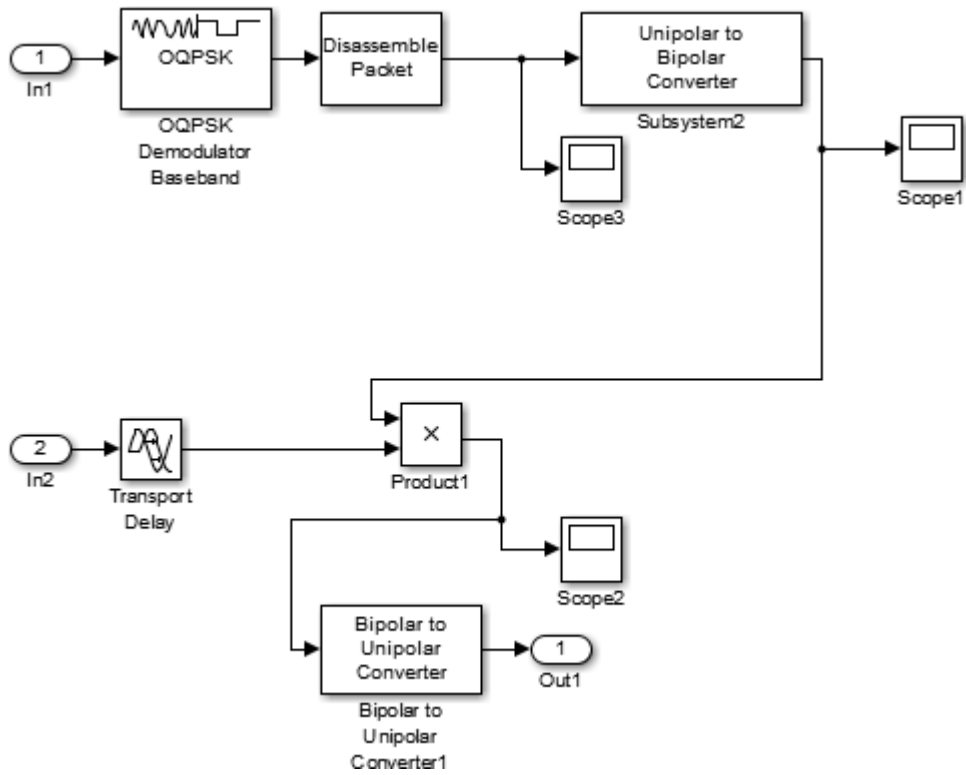


Рис. 6.11. Схема приемника стандарта ZigBee

Рассмотрим каждый блок отдельно. Единственным незнакомым элементом является блок TransportDelay.

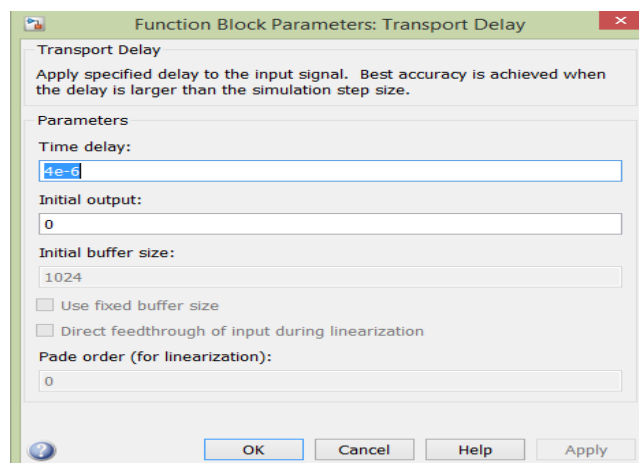


Рис. 6.12. Параметры блока TransportDelay

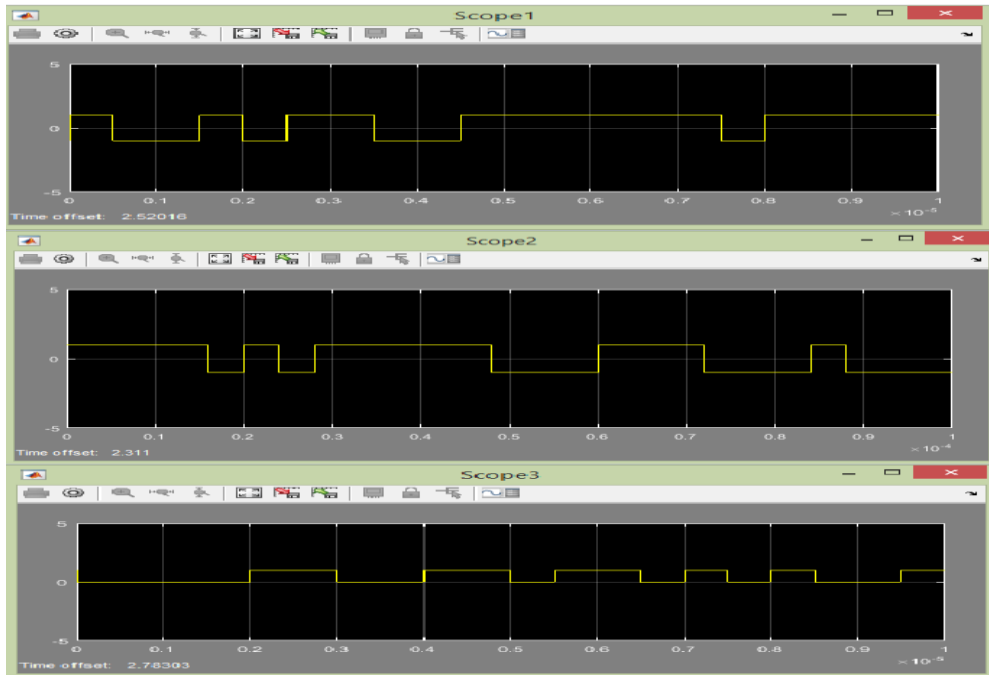


Рис. 6.13. Вид сигнала на осциллографах 1, 2, 3

Вернемся к общей схеме стандарта ZigBee.

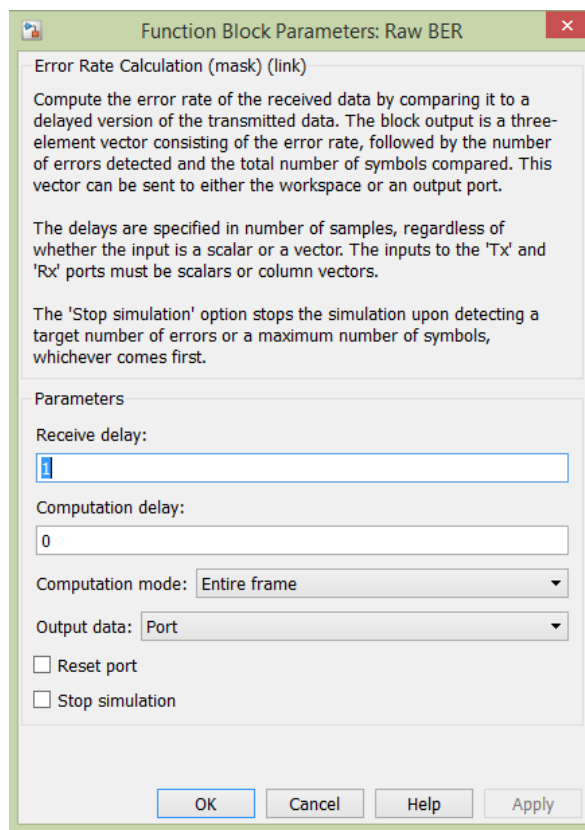


Рис. 6.14. Параметры блока RawBER



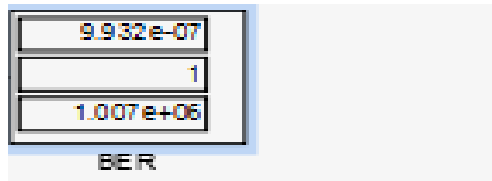


Рис. 6.14. Счетчик ошибок

Для построения графика зависимости BER от SNR, необходимо из счетчика брать первую строку.

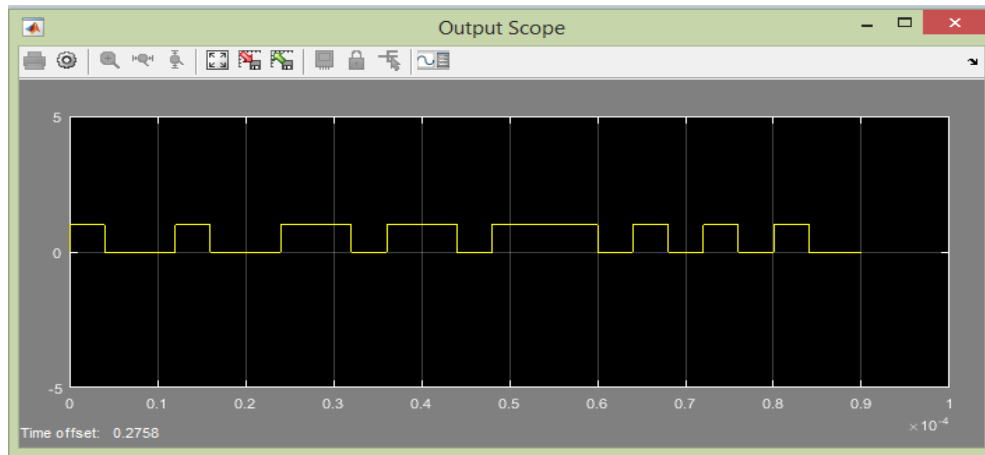


Рис. 6.15. Вид сигнала на выходе

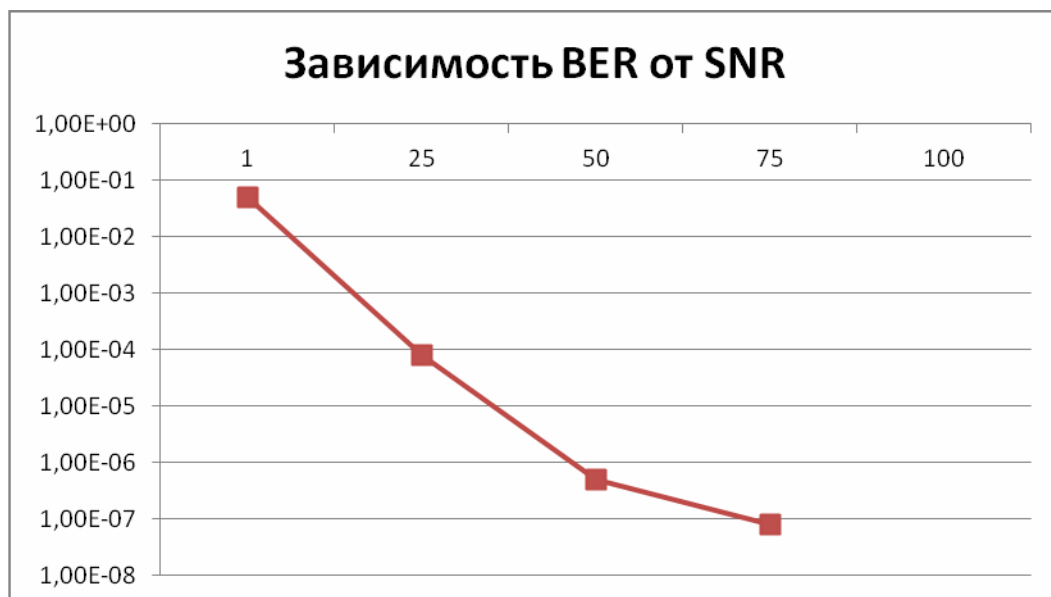


Рис. 6.16. График зависимости BER от SNR

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.

## **7. СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА IEEE 802.15.1 (BLUETOOTH)**

### **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 радиointерфейса 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.

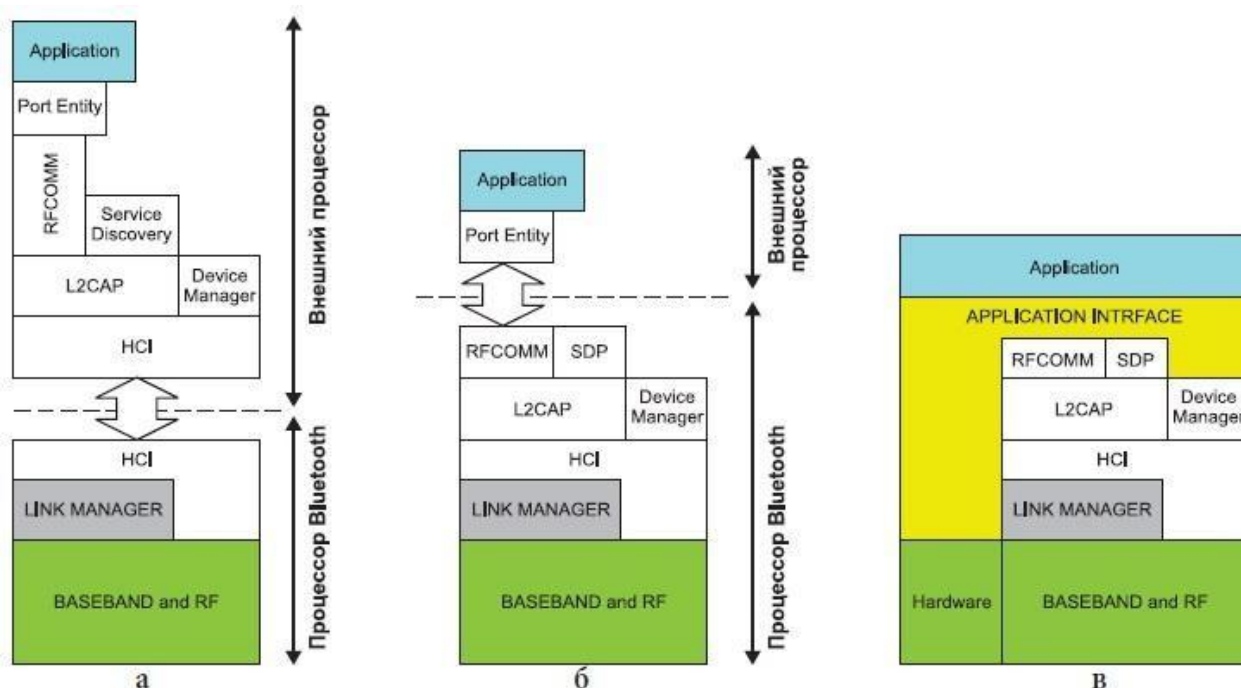


Рис. 7.1. Разновидности архитектуры модулей стандарта Bluetooth: а) двухпроцессорная; б) встроенная двухпроцессорная; в) однопроцессорная

Модули Bluetooth со встроенной двухпроцессорной архитектурой (рис. 5.85б) 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 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.

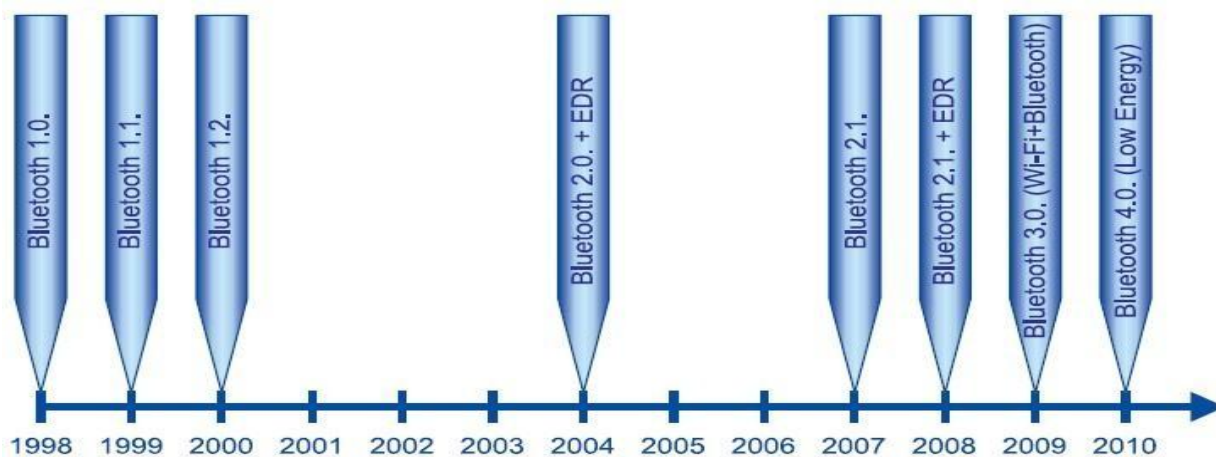


Рис. 7.2. Хронология развития стандарта Bluetooth

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, предусмотриваемая 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.

### 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.

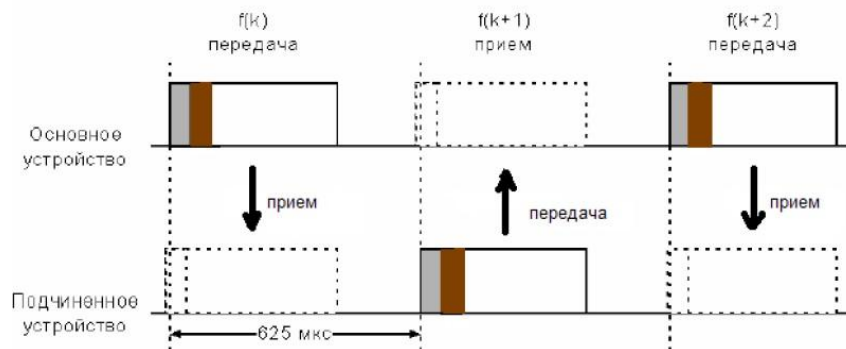


Рис. 7.3. Дуплексная передача с временным разделением

Пакеты в зависимости от длины могут занимать до пяти временных сегментов. При этом частота канала не меняется до окончания передачи пакета.

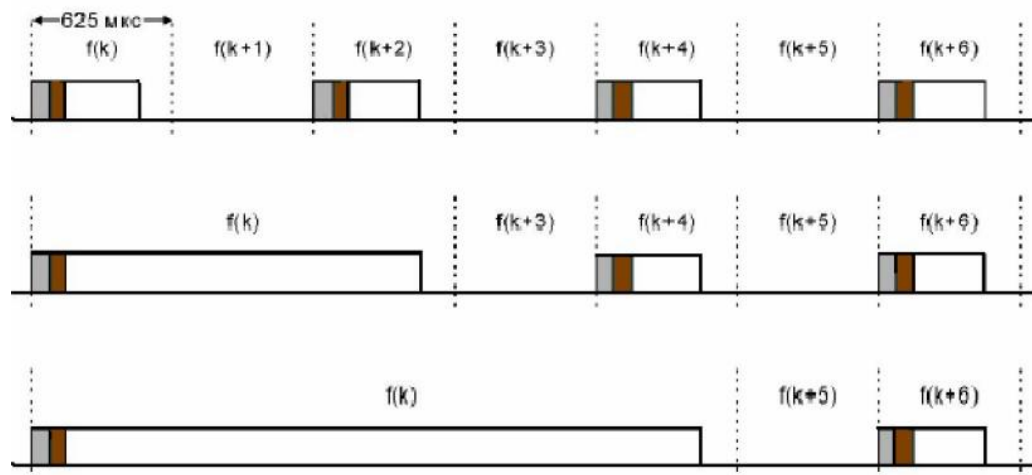


Рис. 7.4. Передача пакетов различной длины

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.

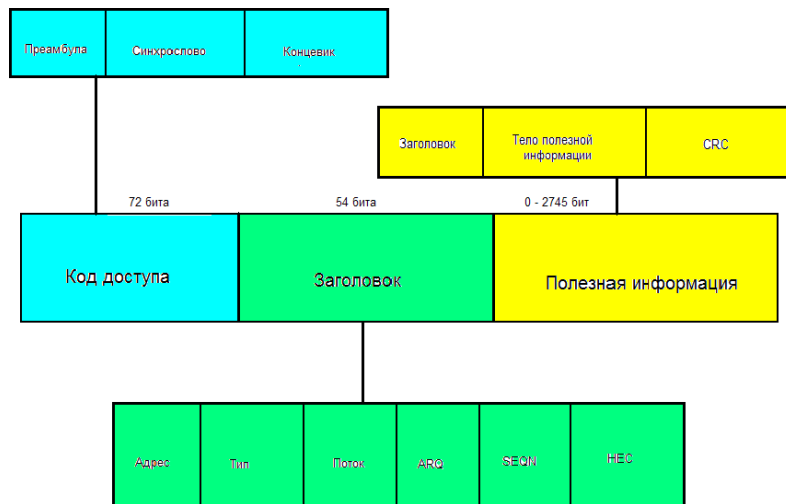


Рис. 7.5. Структура пакета

**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 Заголовок, 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**.

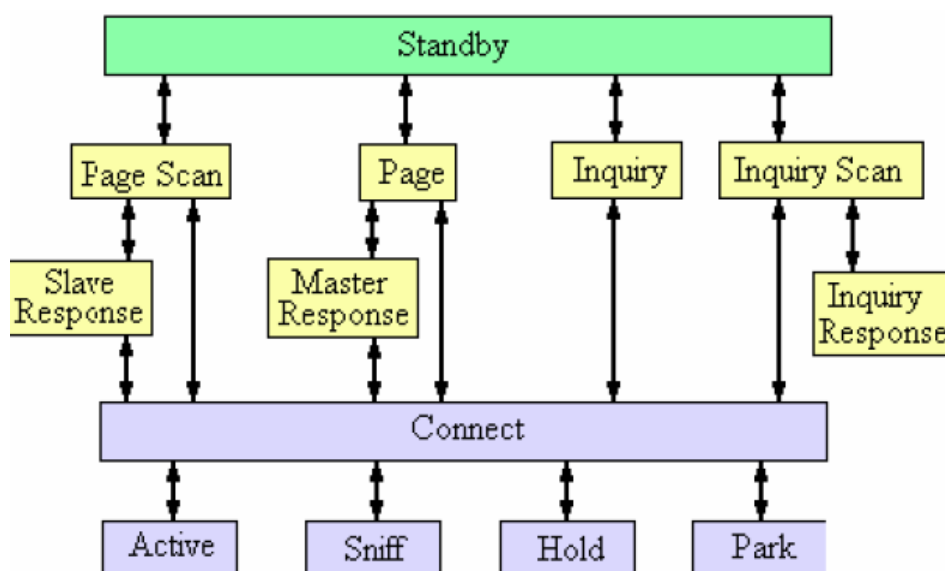


Рис. 7.6. Состояние соединений

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).

Таблица 7.1. Режимы работы Bluetooth

Название режима	Описание
Active	В активном режиме устройство Bluetooth участвует в работе канала. Основной узел (master) диспетчеризует обмены на основе запросов трафика, поступающих от участников. Кроме того, этот режим предусматривает регулярные обмены с целью синхронизации клиентов. Активные клиенты прослушивают домены master-to-slave пакетов. Если к активному клиенту нет обращений, он может пребывать в пассивном состоянии (sleep) до очередной передачи со стороны главного узла
Sniff	Устройства синхронизованные в рамках пикосети могут перейти в режим экономного расходования энергии, когда их активность понижается. В режиме <b>SNIFF</b> , подчиненное устройство прослушивает пикосеть с пониженной частотой. Этот режим имеет наивысшую скважность рабочего цикла (наименьшая экономия энергии) из 3 экономичных режимов ( <b>sniff</b> , <b>hold</b> и <b>park</b> )

Hold	Устройства синхронизованные в рамках пикосети могут перейти в режим экономного расходования энергии, когда их активность понижается. Основной узел пикосети может перевести клиента в режим HOLD, когда работает только внутренний таймер. Подчиненное устройство может запросить перевода в режим HOLD. Передача данных возобновляется мгновенно, когда устройство выходит из режима HOLD. Клиент имеет промежуточную скважность (промежуточный уровень экономии энергии) из указанных 3 режимов (sniff, hold и park)
------	--

### **"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.

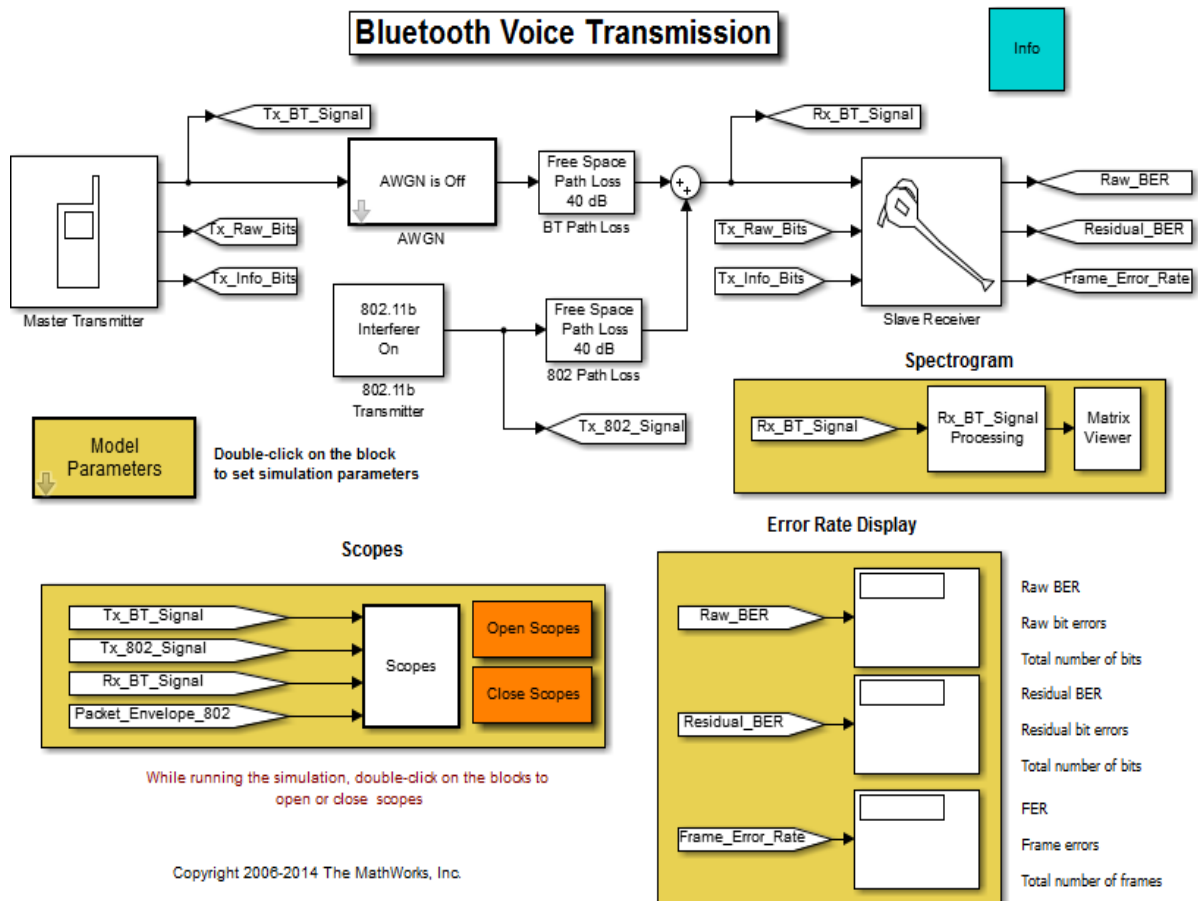


Рис. 7.7. Модель Bluetooth в MATLAB R2015b

### 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.

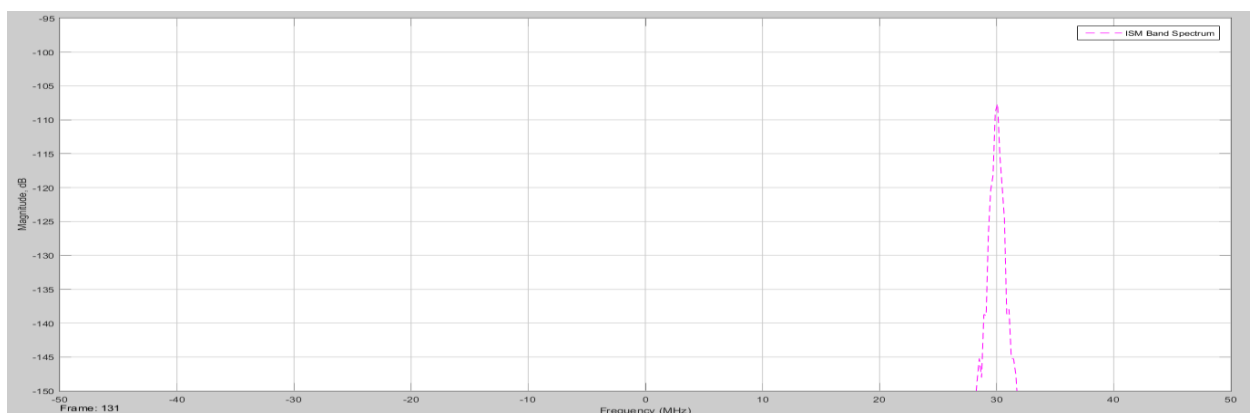


Рис. 7.8. Спектр Bluetooth без мешающего сигнала 802.11

Временная форма сигнала представляет просто набор битов, как и во многих современных системах связи. О значениях каждого бита(структуре кадра) была сказано ранее.

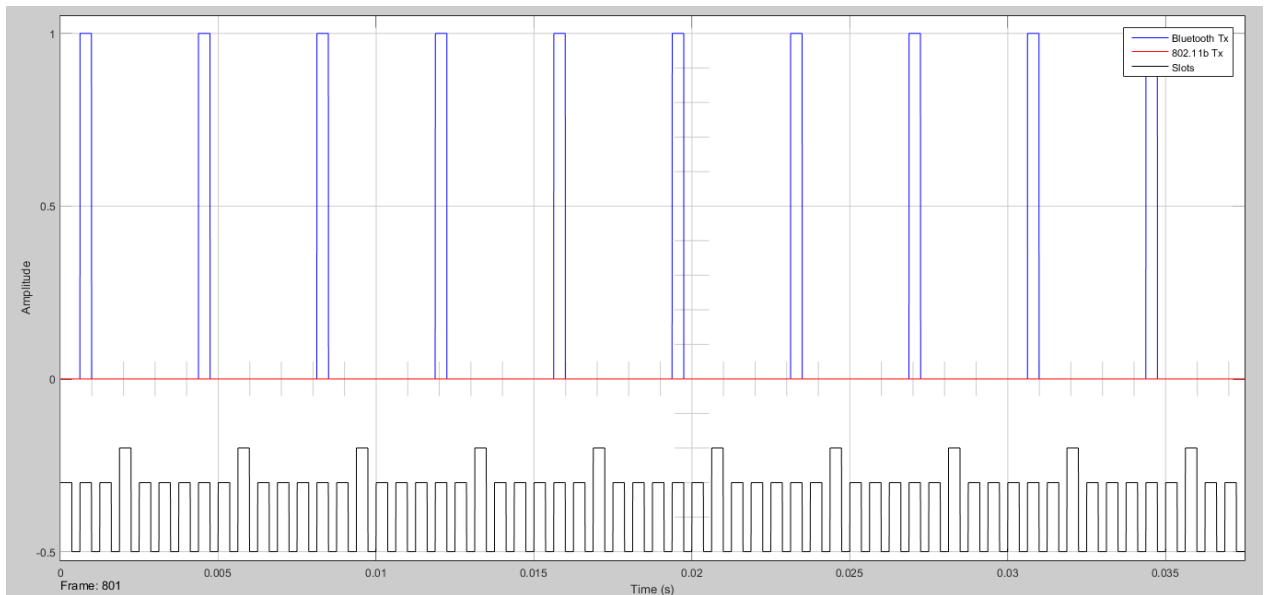


Рис. 7.9. Временная диаграмма Bluetooth без мешающего сигнала 802.11

На рисунке 7.10 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.

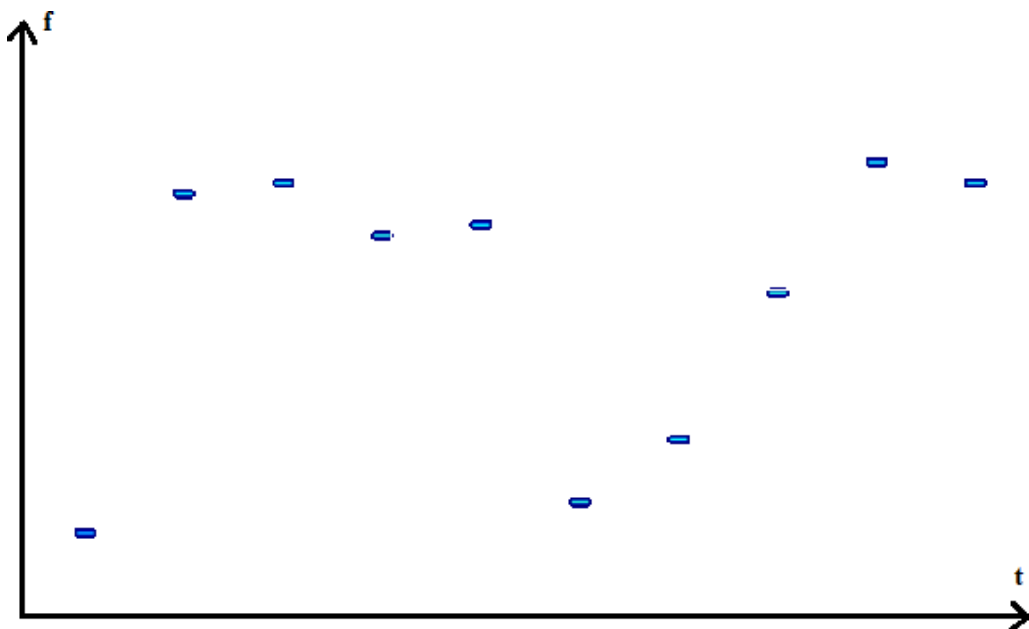


Рис. 7.10. Пример скачков частоты Bluetooth во времени без мешающего сигнала 802.11(WiFi)

На рисунке 7.11 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.

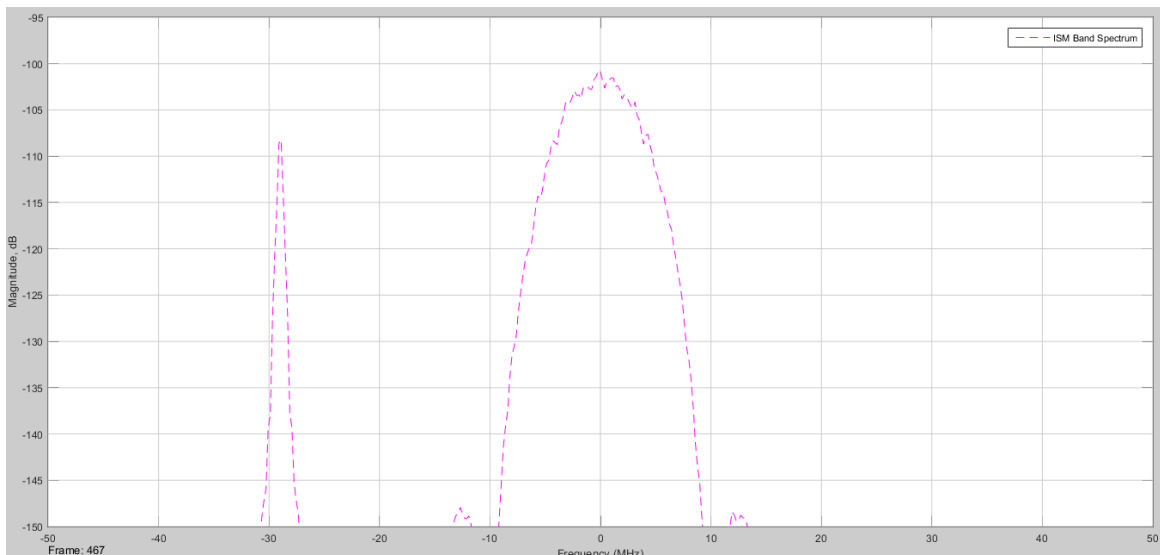


Рис. 7.12. Спектр Bluetooth с мешающим сигналом 802.11

Благодаря тому, что спектры сигналов разнесены в частотной области перекрытие их во временной, не играет большой роли, т.к. сигналы можно без проблем разделить.

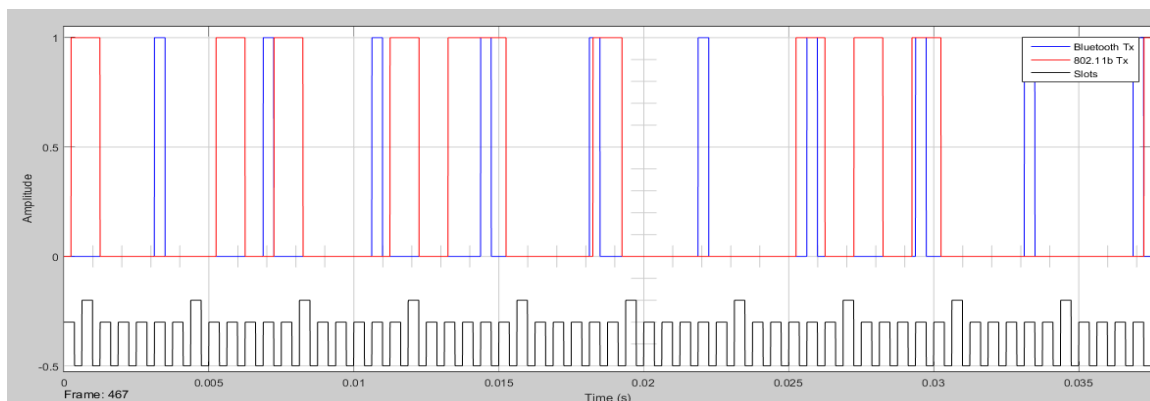


Рис. 7.13. Временная диаграмма Bluetooth с мешающим сигналом 802.11

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

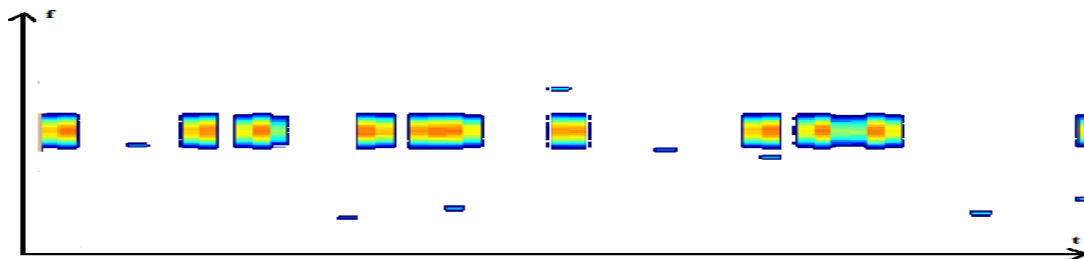


Рис. 7.14. Пример скачков частоты Bluetooth во времени с мешающим сигналом 802.11

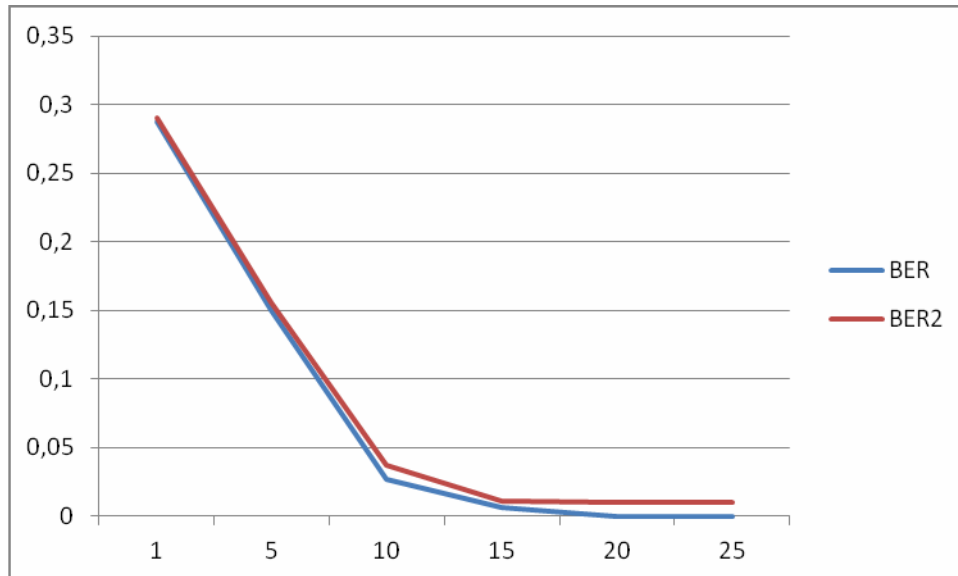


Рис. 7.15. Зависимость BER от SNR. Красным цветом (верхняя кривая) выделен график при включенном мешающем сигнале 802.11

Благодаря алгоритму FHSS система не сильно подвержена влиянию других стандартов передачи данных, работающих в том же диапазоне частот.

В разделе покану технология 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 7.15) видно, что мешающий сигнал 802.11 оказывает незначительное влияние на передачу данных. На рисунке 7.14 видно, что во время передачи сигнала 802.11, сигнал Bluetooth совершает скачок на другую частоту, что также хорошо видно на рисунке 7.14.



## **8.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.

#### **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).

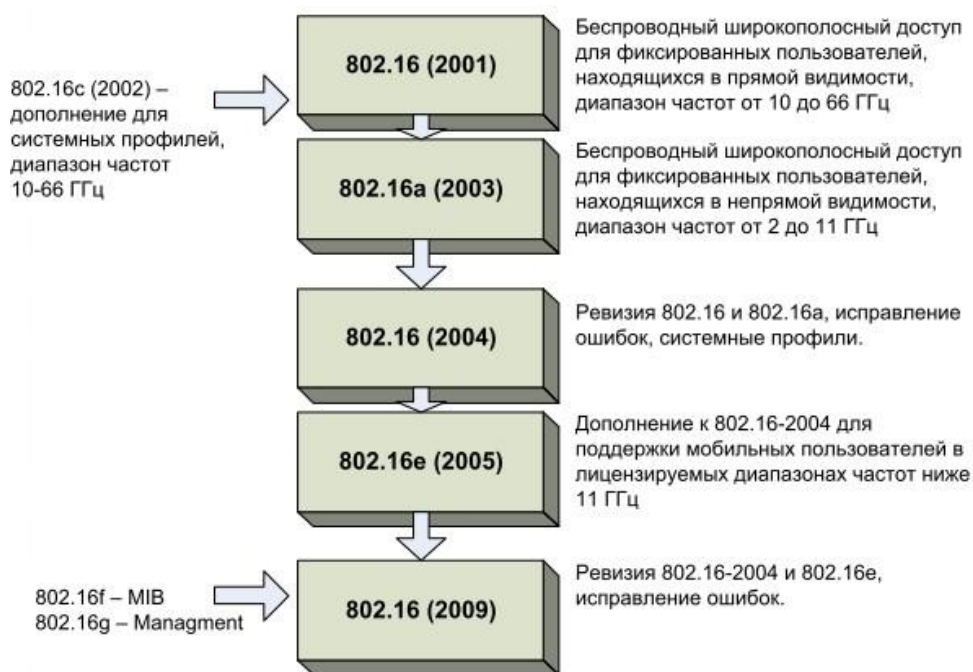


Рис. 8.1. Эволюция стандартов IEEE 802.16

Необходимо различать стандарты связи серии IEEE 802.16 (рисунок 8.1) и форум WiMAX (рисунок 8.2). 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, рисунок 8.3) 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.

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 25 или 28 МГц, скорость передачи данных до 120 Мбит/с.

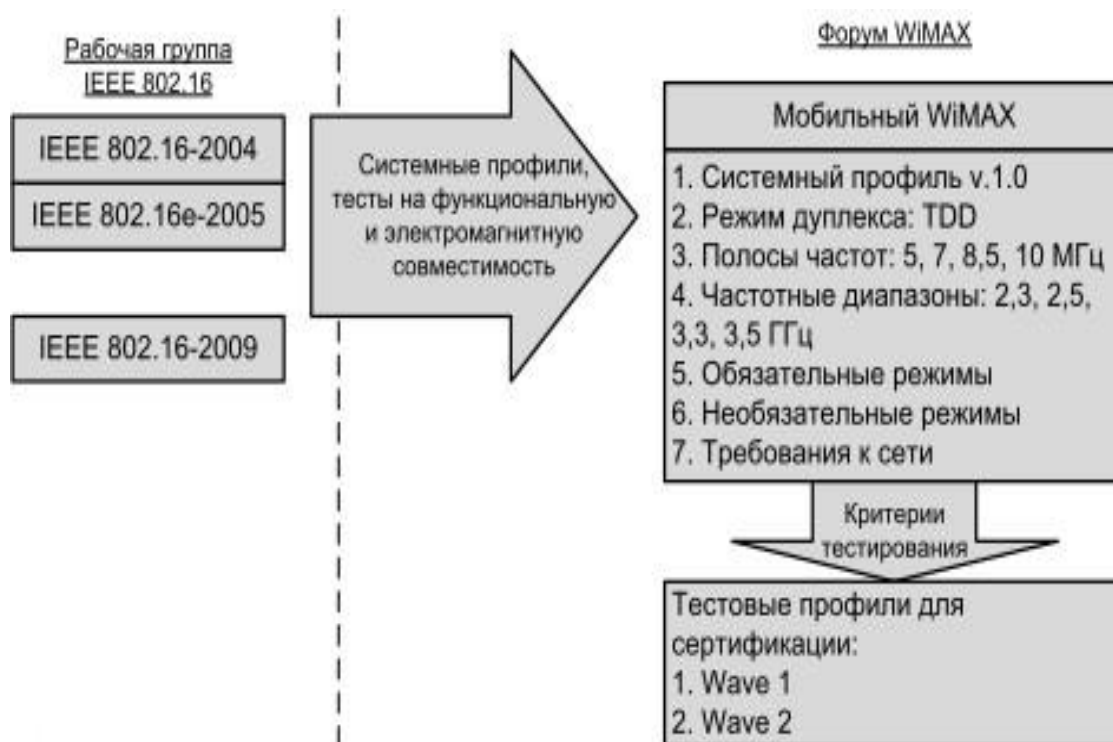


Рис. 8.2. Стандарты серии IEEE 802.16 и форум WiMAX

В диапазоне частот 1-11 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).

Структура стандартов IEEE 802.16 представлена на рисунке 8.3. 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.

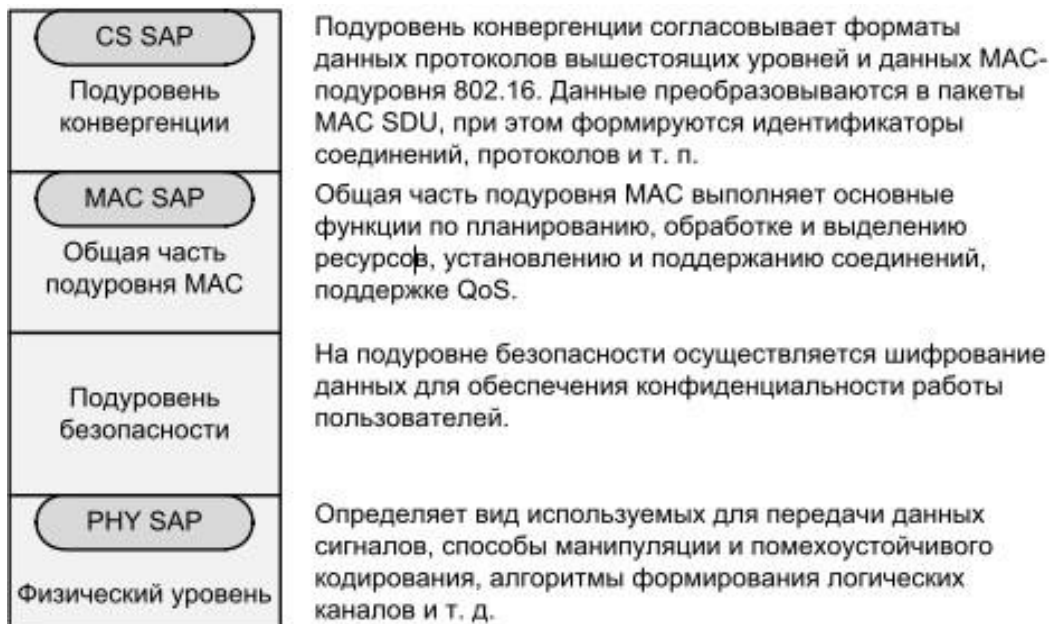


Рис. 8.3. Структура стандартов IEEE 802.16

## Сетевой уровень систем WiMAX

### Архитектура сетей WiMAX IEEE 802.16

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 соединения 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 приемопередатчиков (рисунок 5.71).



Рис. 8.4. 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 8.1. 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.

#### **Базовая модель сетей WiMAX IEEE 802.16 – 2009**

Базовая модель (БМ) сети WiMAX – это логическое представление сетевой архитектуры WiMAX. Термин "логическое" в данном случае означает, что модель рассматривает набор стандартных логических функциональных модулей и стандартных интерфейсов (точек сопряжения этих модулей).

БМ включает три основных элемента: множество абонентских (мобильных) станций (AC), совокупность сетей доступа (ASN, Access Service Network) и совокупность сетей подключения (CSN, Connectivity Service Network). Кроме того, в БМ входят так называемые базовые точки (R1...R8), через которые происходит сопряжение функциональных модулей. Базовая модель WiMAX сети изображена на рисунке 5.72.

Сеть (сети) ASN принадлежит провайдеру сети доступа (NAP, Network Access Provider) — организации, предоставляющей доступ к радиосети для одного или нескольких сервис-провайдеров WiMAX (NSP, Network Service Provider). В свою очередь, сервис-провайдер WiMAX — организация, предоставляющая IP-соединения и услуги WiMAX конечным абонентам. В рамках данной модели именно сервис-провайдеры WiMAX заключают соглашения с интернет-провайдерами, операторами других сетей доступа, соглашения о роуминге. Сервис-провайдеры по отношению к абоненту могут быть домашними и гостевыми, каждый со своей сетью CSN.

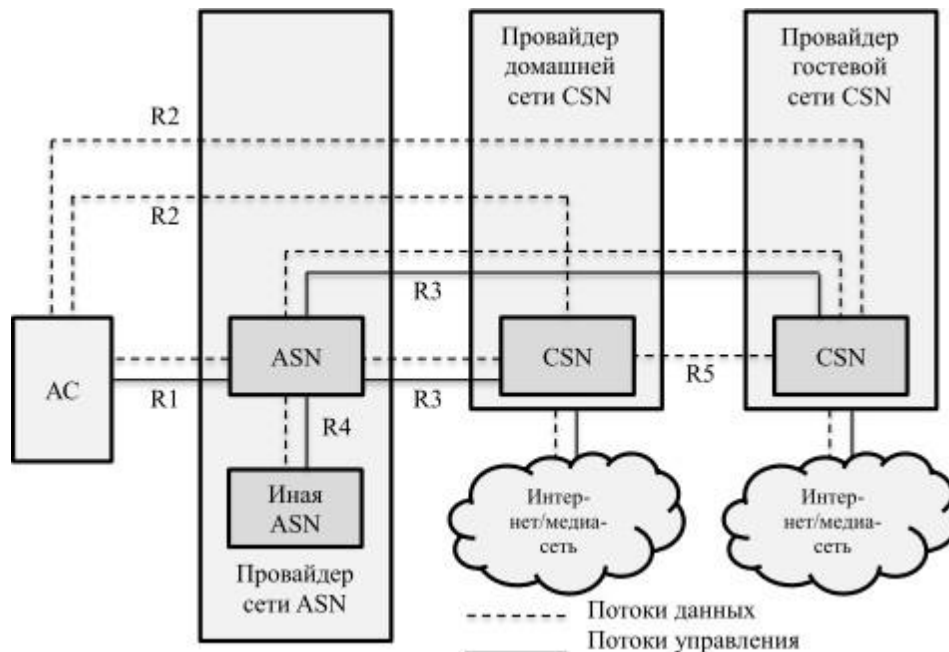


Рис. 8.5. Базовая модель WiMAX-сети

Сеть доступа ASN представляет собой множество базовых станций беспроводного доступа по стандарту IEEE 802.16 и шлюзов для связи с транспортной IP-сетью. Логическая модель доступа представлена на рисунке 5.73. Фактически эта сеть связывает радиосеть IEEE 802.16 и IP-сеть. ASN включает как минимум одну БС и как минимум один ASN-шлюз. Но и базовых станций, и шлюзов в одной ASN может быть несколько, причем одна БС может быть логически связана с несколькими шлюзами. БС в рамках данной модели – это

логическое устройство, поддерживающее набор протоколов IEEE 802.16 и функции внешнего сопряжения.

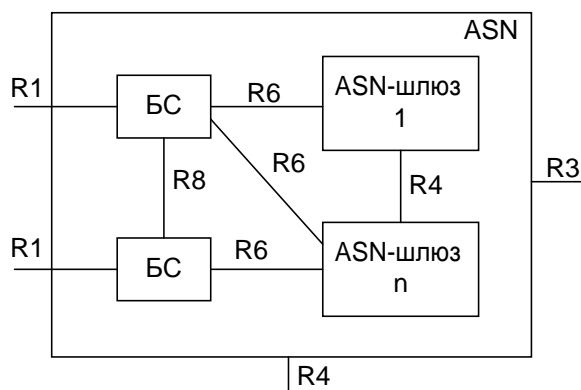


Рис. 8.6. Логическая модель сети доступа ASN

Сети ASN отвечают за передачу данных AC на втором логическом уровне и передают служебные и информационные сообщения AC, поступающие от сетей CSN. Состояния готовности к подключению и обеспечение целостного включения в сеть WiMAX для каждой AC накладывает следующие функциональные требования к ASN:

- обнаружение сети и выбор предпочитаемого абонентом WiMAX NSP;
- подключение AC к сети в соответствии с правилами второго логического уровня IEEE 802.16;
- реализация транслирующей функции для организации подключений AC на третьем логическом уровне (выделение IP-адресов);
  - управление радиоресурсами сети;
  - управление групповыми и широковещательными рассылками;
  - поддержка мобильности с привязкой к ASN;
  - поддержка внешних агентов для мобильности с привязкой к ASN;
  - поддержка туннелей ASN – CSN;
  - управление персональными вызовами и службами для определения местоположения абонентов;
    - продвижение данных;
    - авторизация сервисных потоков;
    - поддержка уровней QoS;
    - управление доступом и контроль соблюдения правил.

Перечисленные функции сетей ASN распределяются между БС и шлюзами ASN в соответствии с профилями, определенными в документе — «Release 1.0» форума WiMAX. На сегодняшний момент описано три таких профиля: А, В и С. На рисунке 5.107



представлена архитектура профиля С. Все профили обеспечивают функциональную совместимость между CSN и другими ASN через специальные опорные точки.

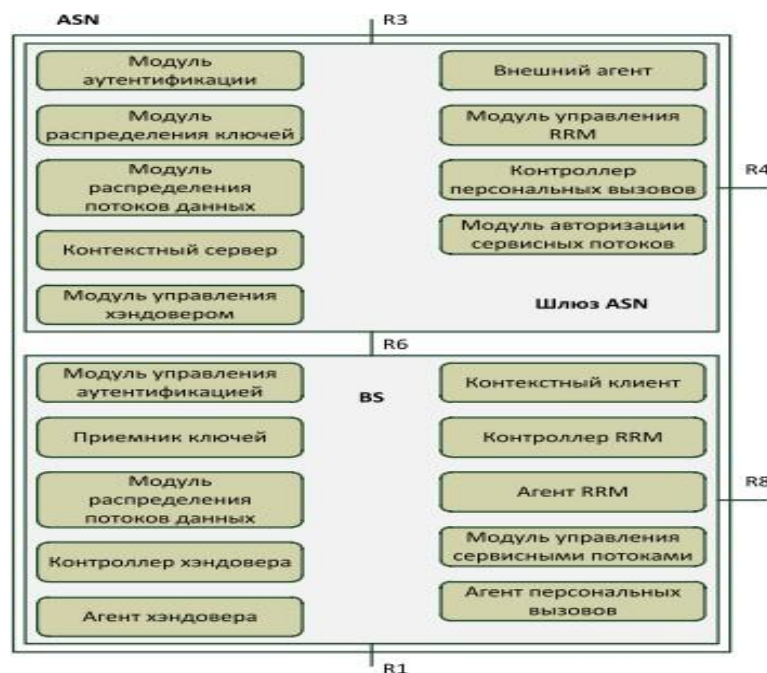


Рис. 8.7. Архитектура профиля С

Профиль В подразумевает полную свободу производителя, ему соответствует как концентрация всех функций в одном устройстве, так и их произвольное распределение. Профили А и С чрезвычайно похожи. Различие состоит в том, что в профиле А функции контроллера радиоресурсов и управления хэндовером отнесены к ASN-шлюзу, а в профиле С — к базовой станции. Несмотря на это незначительное различие, профиль А был официально закрыт в 2007 г. на сессии WiMAX Forum, а общепризнанным стандартом стал профиль С.

Шлюз ASN (шлюз радиоподсети) — это логическое устройство, связывающее базовые станции одной ASN с другими сетями доступа и с сетью подключения CSN. Шлюз ASN обеспечивает связность как на уровне каналов передачи данных, так и на уровне управления. Шлюз ASN может быть представлен как совокупность двух групп функциональных элементов: блока решения (DP, Decision Point) и блока исполнения (EP, Enforcement Point).

Блок решения шлюза ASN выполняет функции управления инвариантно к виду используемых радио интерфейсов. Шлюз ASN может содержать модуль, управляющий аутентификацией и распределением ключей, для реализации инфраструктуры AAA (Authentication, Authorisation, Accounting). Инфраструктура AAA проверяет полномочия пользователей в процессе их подключения или переподключения к сети по алгоритму EAP и создает безопасную среду с разделяемыми между АС и БС ключами. Инфраструктура AAA также отвечает за ведение статистики по абонентам.

Шлюз ASN реализует управление текущим профилем AC и осуществляет контроль за соблюдением правил CSN. Управление профилем AC включает в себя определение и сохранение аутентификационных данных, параметров безопасности, а также настроек AC, необходимых при пере-ключении AC на другую БС.

В процессе хэндовера (процесс передачи абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной базовой станции к другой) шлюз ASN осуществляет переключение канала передачи данных к требуемой БС. Шлюз ASN также обеспечивает целостность передаваемых данных для минимизации задержек распространения и снижения количества потерянных пакетов. Шлюз ASN содержит внешний агент для поддержки хэндовера на третьем логическом уровне и взаимодействия с домашним агентом в случае перехода AC от одной сети ASN к другой. Контроллер персональных вызовов и регистр местоположения в шлюзе ASN осуществляют поддержку персональных вызовов и работы AC в режиме ожидания.

Блок исполнения шлюза ASN отвечает за фильтрацию пакетов, организацию туннелей, управлением доступом, контроль за соблюдением правил, поддержку уровней QoS и продвижение данных. Блок исполнения может поддерживать протоколы IPv4/v6 и протоколы групповой и индивидуальной маршрутизации. Шлюз ASN является центральным элементом сетей ASN, выполняет функции интерфейса к внешним сетям и реализует различные службы IP.

Последним рассматриваемым компонентом ASN является устройство, называемое внешним агентом (FA, Foreign Agent). Это — маршрутизатор, отслеживающий принадлежность AC к той или иной БС в каждый момент времени для распределения информационных потоков

Сеть подключения CSN — это сеть оператора WiMAX. Именно в ней реализуются функции управления авторизацией, аутентификацией и доступом, подключение абонентов WiMAX к глобальным IP-сетям, предоставление таких услуг, как IP-телефония, доступ к телефонным сетям общего пользования, доступ в интернет и частные сети. Базовая модель сети WiMAX допускает, что одной сетью доступа ASN могут пользоваться несколько сервис-провайдеров, каждый со своей CSN. Напротив, одна CSN может подключаться к сетям доступа разных провайдеров доступа.

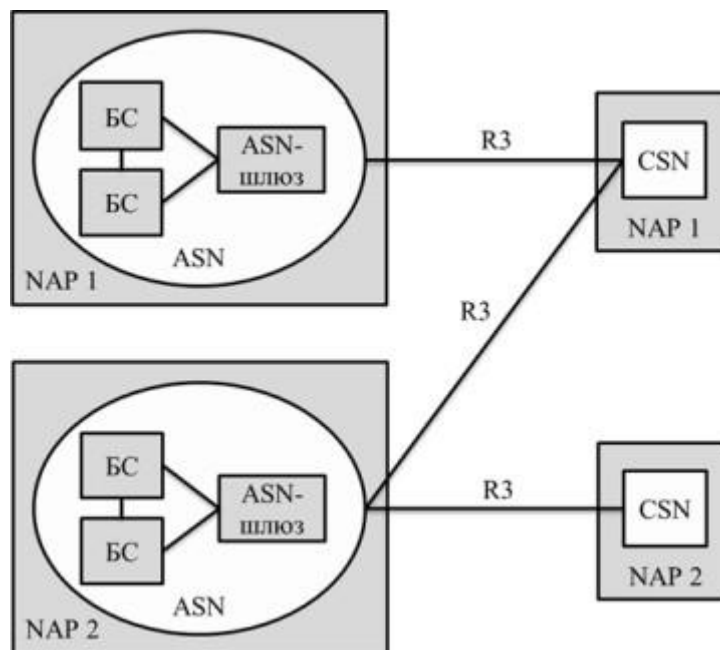


Рис. 8.8. Модель взаимодействия сетей доступа и сетей подключения различных провайдеров

Сеть CSN представляет собой набор сетевых функций, которые обеспечивают абонента WiMAX различными службами IP. CSN может выполнять следующие функции:

- выделение IP-адресов;
- предоставление доступа к интернету;
- реализацию сервера или прокси-сервера для инфраструктуры AAA;
- управление доступом и контроль за соблюдением правил на основе профилей пользовательской подписки;
- поддержка туннелей ASN – CSN;
- учет оплаты абонентских услуг;
- поддержка туннелей между CSN для роуминга;
- поддержка перемещений абонента между различными ASN;
- поддержка специальных служб WiMAX таких, как службы, основанные на определении местоположения абонента (LBS — location based services), одноранговые службы, подключение спецслужб, групповые широковещательные рассылки.

Процедуры аутентификации, авторизации и контроля доступа выполняет устройство, называемое AAA-сервером. При этом под аутентификацией пользователя понимается проверка его подлинности и возможности доступа в сеть, под авторизацией — выделение ему ресурсов сети в соответствии с услугами, на которые он подписан и под контролем доступа — подсчет потребленных пользователем ресурсов (количество времени или размер переданных данных) для формирования счета за пользование сетью. Также каждая CSN

содержит домашний агент (НА, Home Agent), который является роутером-шлюзом, расположенным на границе WiMAX сети и внешних сетей.

Опорные точки в рамках базовой модели сети WiMAX — это каналы связи между базовыми модулями. Они определяют собой стандартные интерфейсы, причем не обязательно физические, если соединяемые опорной точкой модули конструктивно находятся в одном устройстве. Назначение опорных точек описано в таблице 2.2. Опорные точки необходимы для того, чтобы улучшить функциональную совместимость устройств, выпускаемых различными производителями.

БС WiMAX является логическим объектом, который реализует радио интерфейс и интерфейс к IP-сетям. БС реализует физический уровень и MAC-подуровень стандарта IEEE 802.16, а также одну или несколько функций ASN для взаимодействия со шлюзом ASN и другими БС. Экземпляр БС стандарта IEEE 802.16 поддерживает один сектор с одной несущей частотой, одна БС может взаимодействовать с несколькими шлюзами ASN для балансировки нагрузки и/или обеспечения избыточности передаваемых данных. Физически БС может включать в себя несколько объектов БС, так как БС определена как логический объект. Основным элементом БС является планировщик задач, осуществляющий управление частотно-временными ресурсами сети при организации обмена в нисходящем и восходящем каналах связи.

Таблица 8.2. Назначение опорных точек БМ сети WiMAX IEEE 802.16

Опорная точка	Назначение
R1	Канал связи между мобильной станцией и сетью доступа ASN, беспроводный интерфейс стандарта IEEE 802.16.
R2	Канал между МС и шлюзом ASN или CSN, включает процедуры аутентификации, авторизации АС и IP-конфигурирования. Данная точка представляет собой логический интерфейс, который обычно используется для аутентификации, авторизации конфигурирования IP и управления мобильность АС.
R3	Содержит набор протоколов для взаимодействия ASN и CSN для реализации процедур AAA и контроля за выполнением правил сети. Данная опорная точка применяется, когда АС находится в гостевой сети и обменивается информацией с домашней сетью.

R4	Канал связи между ASN-шлюзами различных ASN-сетей или одной ASN-сети. Данная опорная точка используется при перемещении AC между различными ASN. В отличие от предыдущих точек, между точками R4 могут создаваться защищенные соединения, в том числе, с использованием протоколов IP-Sec или SSL VPN.
R5	Канал связи между сетью домашнего и гостевого сервис-провайдера.
R6	Интерфейс между БС и ASN.
R7	Виртуальный канал между блоками DP и EP в ASN-шлюзах.
R8	Канал связи непосредственно между БС. Данная опорная точка применяется для передачи сигнализации в процессе хэндовера и при балансировке нагрузки между несколькими БС. Так же, как и для точек R4, между точками R8 могут создаваться защищенные соединения, в том числе, с использованием IP-Sec или SSL VPN.

### Поддержка мобильности в сетях WiMAX IEEE 802.16

Одно из главных направлений в области описания и стандартизации сетей WiMAX IEEE 802.16 — обеспечение глобальной мобильности абонентов WiMAX, их свободы перемещаться между различными сетями во всем мире, постоянно оставаясь — «на связи». Особенно актуально это замечание для мобильных сетей WiMAX, абоненты которых являются обладателями небольших пользовательских терминалов, которые чаще всего берутся с собой в командировки, деловые поездки и на отдых.

В связи с поддержкой мобильности в базовой модели сети WiMAX введены понятия домашних и гостевых сервис-провайдеров — соответственно, H-NSP и V-NSP (рисунок 2.9). Домашний NSP — это оператор, заключивший договор об обслуживании с абонентом WiMAX. Именно он реализует функции AAA. Для поддержки роуминга домашний сервис-провайдер WiMAX заключает роуминговые соглашения с другими NSP. Гостевой NSP — это оператор, который предоставляет WiMAX-абоненту услуги роуминга. Прежде всего, V-NSP обеспечивает для такого абонента функции AAA, а также полный или частичный доступ ко всем услугам WiMAX-сети.

WiMAX-сетях выделяют два вида мобильности: микро- и макромобильность. Метод обеспечения микро-мобильности применяется в случае движения AC в пределах одной ASN. Все функции выполняет сама ASN с помощью маршрутизатора FA. При этом методе CSN не участвует в процедуре передачи абонента от одной БС к другой (хэндовер) и не осведомлена

о ней. IP-адрес АС остается неизменным. Процедура хэндовера на радиоинтерфейсе определена стандартом IEEE 802.16.

### Мобильность с привязкой к ASN (микромобильность)

В процессе перемещения АС меняет точку привязки. В случае, когда точка привязки (БС) принадлежит той же ASN, АС не меняет свой IP-адрес. Такой тип мобильности называется мобильностью с привязкой к ASN. Существует также мобильность с привязкой к CSN, при которой АС перемещается между зонами действия БС, принадлежащих разным ASN.

Управление перемещением АС необходимо для снижения количества потерянных пакетов, уменьшения задержек при хэндовере и сохранении порядка следования пакетов при требуемом уровне безопасности.



Рис. 8.9. Модель взаимодействия операторов сервисных сетей WiMAX IEEE 802.16, сетей доступа и абонентов

### Мобильность с привязкой к CSN (макромобильность)

В случае, когда АС перемещается в зону покрытия БС, принадлежащей другой ASN, имеет место мобильность на основе IP, что приводит к перепривязке текущего внешнего агента к новому внешнему агенту.

Метод обеспечения макромобильности необходим при перемещении АС между различными ASN. Его суть состоит в переключении пути данных с одного интерфейса R3 на другой. Метод основан на использовании MIP (Mobile IP) — интернет-протокола, обеспечивающего передвижение абонента между сетями без изменения его IP-адреса. Таким образом, устройство, с которым абонент обменивается информацией, не замечает этого передвижения. MIP подразумевает, что у каждого устройства есть два IP-адреса — основной (HoA), присвоенный ему в домашней сети, и дополнительный (CoA).

MIP использует следующие функциональные компоненты: MIP-клиент (MIP client), FA, HA. MIP клиент может располагаться в АС (CMIP, Client MIP) — в этом случае АС

должен быть присвоен глобальный CoA. Этот адрес AC сообщает HA домашней сети, который перехватывает все сообщения по HoA и направляет их по CoA (как правило, в режиме туннелирования и инкапсуляции). Также MIP клиент может быть расположен в FA ASN, который будет действовать от имени MS, от которой не требуется поддержки протокола MIP. При этом для всех сетей, лежащих за пределами ASN, в роли CoA мобильной станции выступает IP-адрес внешнего агента. Настоящий CoA AC присваивается FA и используется для маршрутизации пакетов внутри ASN. Основной IP-адрес мобильной станции для этих целей не используется из-за опасности его совпадения с IP-адресом другой AC, работающей внутри этой же ASN. В сетях WiMAX IEEE 802.16 обязательна поддержка обоих случаев расположения MIP-клиента.

HA содержит таблицу соответствия IP-адреса AC (основного или дополнительного, в зависимости от того, является ли данный NSP домашним по отношению к абоненту) IP-адресу FA, к которому относится эта AC. Таким образом, HA имеет информацию о том, к какому FA отправлять пакеты, предназначенные данной AC.

### **Физический уровень 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).

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), при которой абонентские устройства могут одновременно функционировать и как базовые станции, что сильно упрощает развертывание сети и помогает преодолеть проблемы прямой видимости.

### **Модуляция OFDM**

При формировании OFDM-сигнала 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 8.10, спектральная кривая любой из поднесущих имеет нулевое значение для «центральной» частоты смежной кривой. Именно эта особенность спектра поднесущих и обеспечивает отсутствие между ними интерференции.

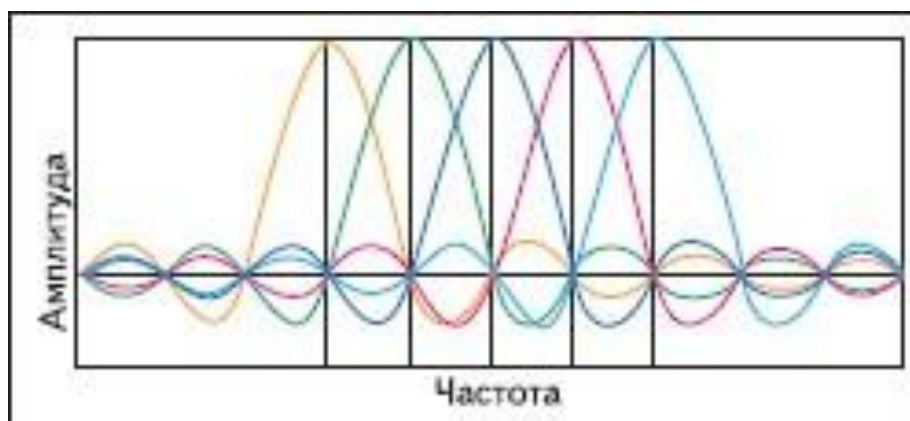


Рис. 8.10. Ортогональные поднесущие

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 8.10).



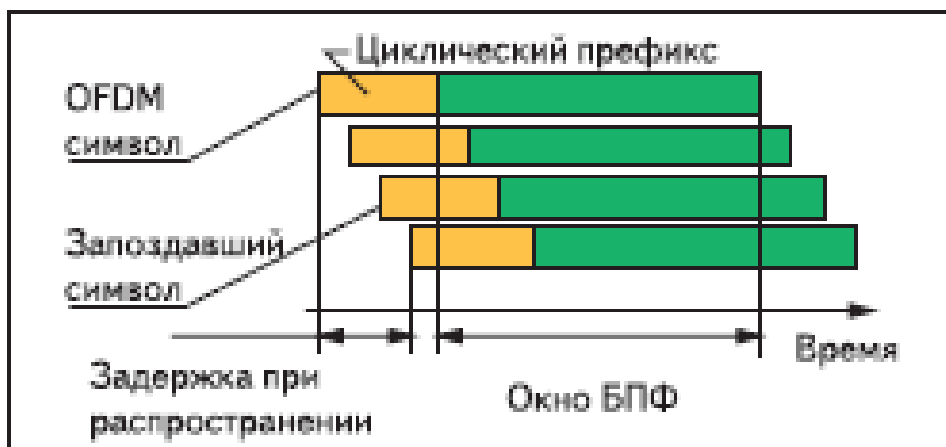


Рис. 8.11. Обработка OFDM-символа при многолучевом распространении

### Канальное кодирование данных

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 относятся сверточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби и коды Рида-Соломона. К относительно новым — блочные и сверточные турбокоды. Для увеличения эффективности кодирования без снижения скорости кода применяется перемежение данных. Перемежение увеличивает эффективность кодирования, поскольку пакеты ошибок дробятся на мелкие фрагменты, с которыми справляется система кодирования.

### Уровень доступа к среде сетей WiMAX

#### Подуровни стандарта IEEE 802.16

Физический уровень стандарта IEEE802.16 организует непосредственную доставку потоков данных между БС и АС. Все задачи, относящиеся к формированию структур этих данных, а также контроль передачи потоков производятся на MAC-уровне (Medium Access Control). Оборудование стандарта IEEE 802.16 создаёт транспортную среду для трансляции потоков различных услуг (сервисов). Поток услуги (service flow) – центральная концепция MAC-протокола.

Обобщенная задача уровня MAC – это поддержка механизма различных услуг верхнего уровня. Разработчики стандарта стремились реализовать единый для всех приложений протокол MAC-уровня, независимо от особенностей физического канала, что позволяет сопрягать терминалы конечных пользователей с кабельными сетями передачи.

Физически среды передачи в разных соединениях сети могут быть различны, но структура данных одинакова. В одном канале могут работать (не одновременно) десятки различных абонентских терминалов. Абоненты являются потребителями самых разных

сервисов (приложений) в виде соединений по протоколу IP. Качество услуг (QoS) каждого отдельного соединения не должно изменяться при передаче информации через сети IEEE 802.16e. Алгоритмы и механизмы доступа MAC-уровня должны решать эти задачи.

MAC-уровень IEEE 802.16 включает три подуровня:

- подуровень преобразования потоков услуг (CS - Convergence Sublayer);
- основной подуровень (CPS - Common Part Sublayer);
- подуровень безопасности (PS - Privacy Sublayer).

В таблице 8.3 приведены операции, реализуемые на отдельных подуровнях уровня MAC.

Таблица 8.3. Основные операции на уровне MAC

Подуровень преобразования	Общая часть MAC	Подуровень безопасности
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Упаковка PDU для нижестоящего уровня</li> <li>• Распаковка PDU для вышестоящего уровня</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ввод и подавление заголовков</li> <li>• Режим запроса повторной передачи</li> <li>• Фрагментация</li> <li>• Установление соединения/разъединения</li> <li>• Управление качеством (QoS)</li> <li>• Многопользовательские услуги</li> <li>• Соединение/разъединение с сетью</li> <li>• Управление предоставляемой полосой частот</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Поддержка режима шифрации</li> <li>• Обмен данными при переходе к шифрации</li> <li>• Обмен ключом авторизации</li> <li>• Взаимная аутентификация</li> </ul>

На подуровне преобразования потоков услуг осуществляется преобразование потоков данных протоколов верхних уровней для передачи по сети WiMAX. Стандарт предусматривает свой механизм трансформации для каждого типа приложений верхних уровней. При этом можно реализовать различные протоколы пакетной передачи данных: ATM, PPP, IEEE 802.3 (Ethernet).

## Общий подуровень доступа к среде

В общей части подуровня MAC реализованы методы множественного доступа, управления ресурсами, установки соединений и функции поддержки работоспособности системы. В ядре MAC - подуровня также обеспечивается работа системы безопасности WiMAX и предоставляется точка входа на физический уровень сети для передачи данных по радиointерфейсу.

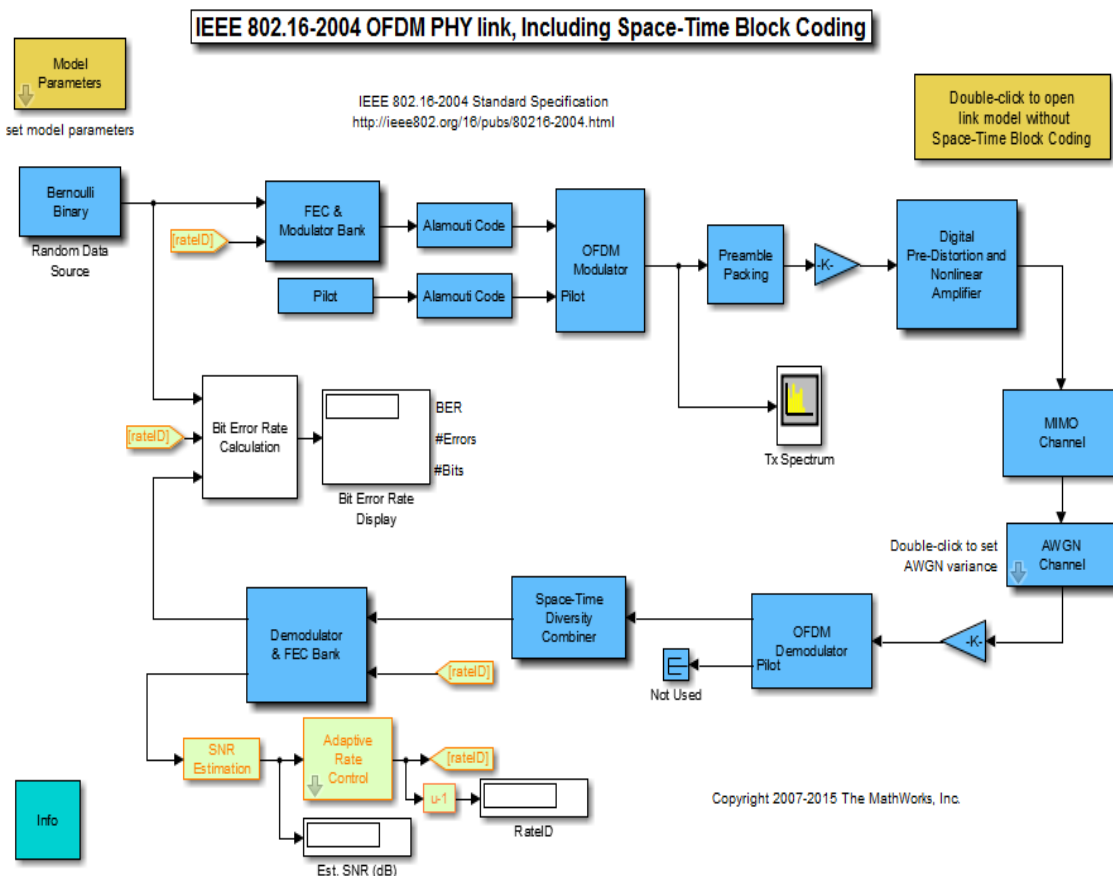
## Подуровень безопасности

Подуровень безопасности осуществляет криптозащиту данных и механизмы аутентификации/предотвращения несанкционированного доступа. С этой целью реализованы наборы алгоритмов криптозащиты и протокол управления ключами шифрования.

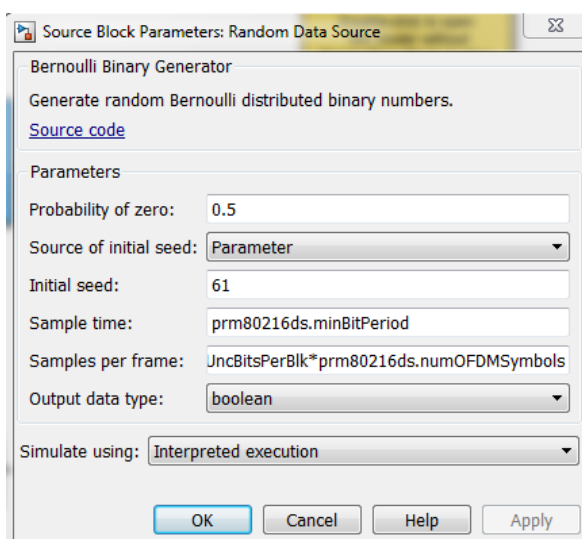
## Практическая часть. Описание экспериментальной установки и методики измерений

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.



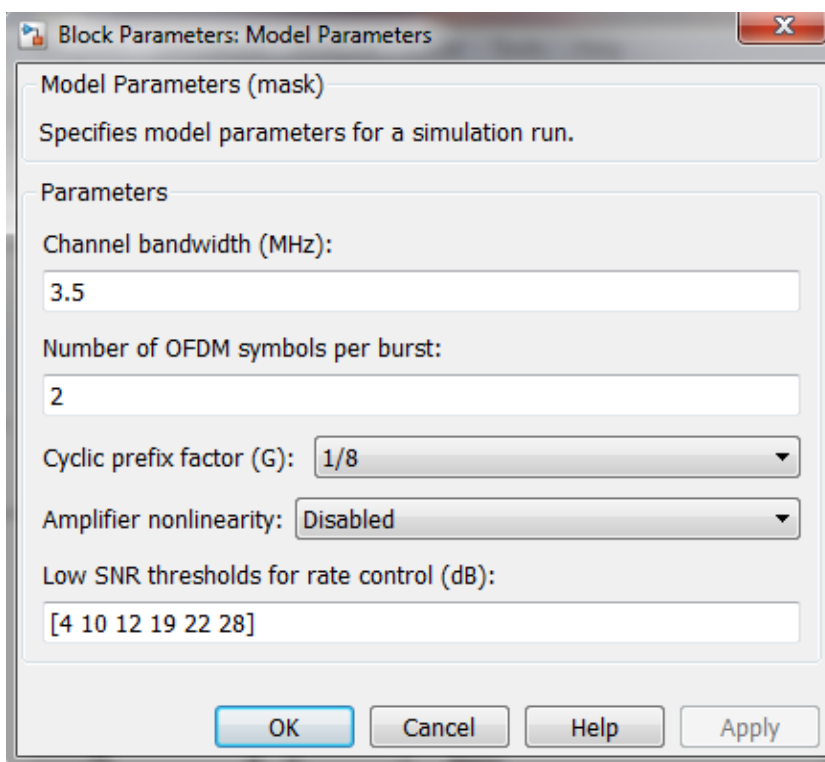
Параметры источника случайной последовательности Bernulli Binary



Параметры блока Bernulli Binary

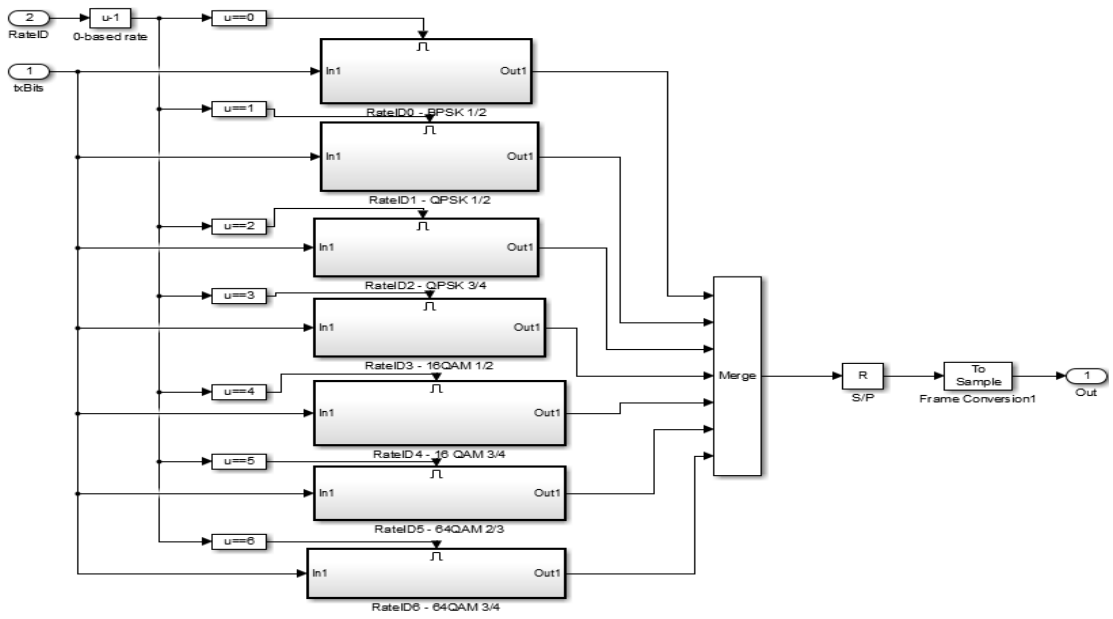
При проведении симуляции существует возможность изменения ряда параметров системы в следующих блоках:

Общие параметры модели (блок «Model Parameters»).



Параметры системы, изменяемые в блоке «Model Parameters»

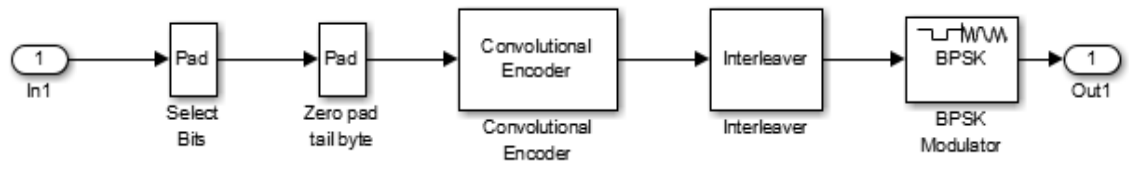
Блок помехоустойчивого кодирования и модуляции («FEC & Modulator Bank», рисунок 3.5) производит формирование сигнально-кодовой конструкции (СКК) определенного вида в зависимости от условий передачи.



Состав блока «FEC & Modulator Bank»

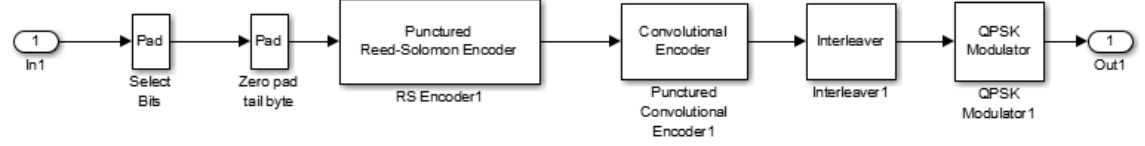
Рассмотрим состав каждого входящего блока:

Состав блока модулятора BPSK 1/2:



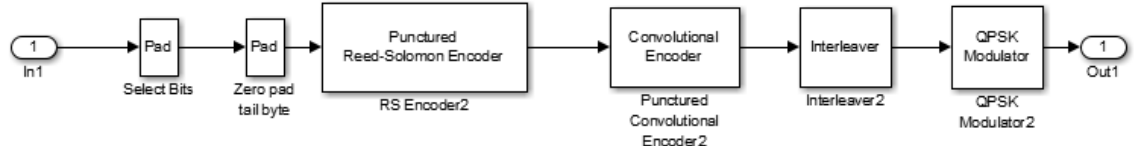
Состав блока модулятора «BPSK 1/2»

Состав блока модулятора QPSK 1/2:



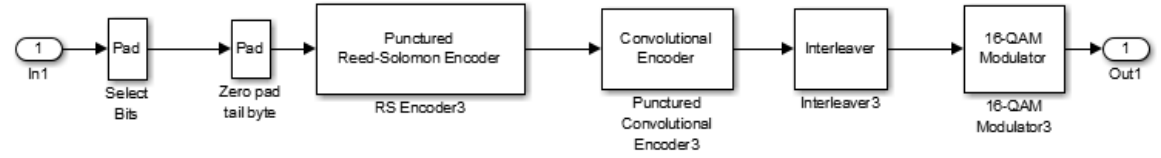
Состав блока модулятора «QPSK 1/2»

Состав блока модулятора QPSK 3/4:



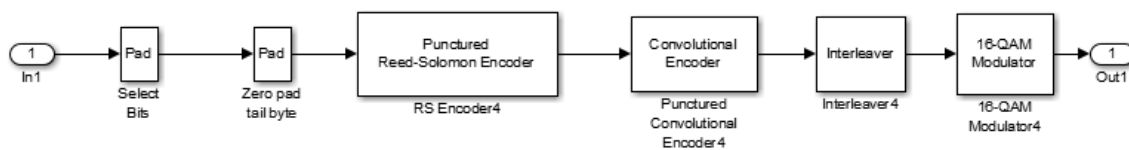
Состав блока модулятора «QPSK 3/4»

Состав блока модулятора 16QAM 1/2:



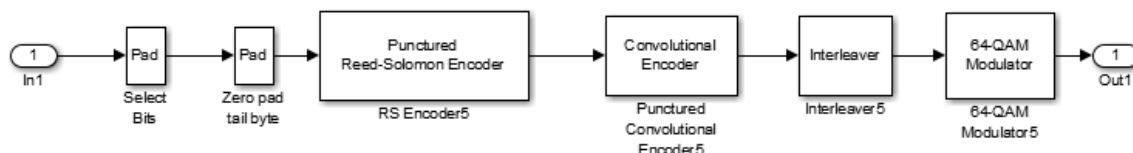
### Состав блока модулятора «16QAM 1/2»

Состав блока модулятора 16QAM 3/4:



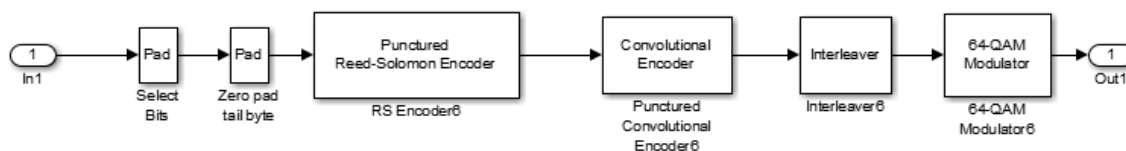
### Состав блока модулятора «16QAM 3/4»

Состав блока модулятора 64QAM 2/3:



### Состав блока модулятора «64QAM 2/3»

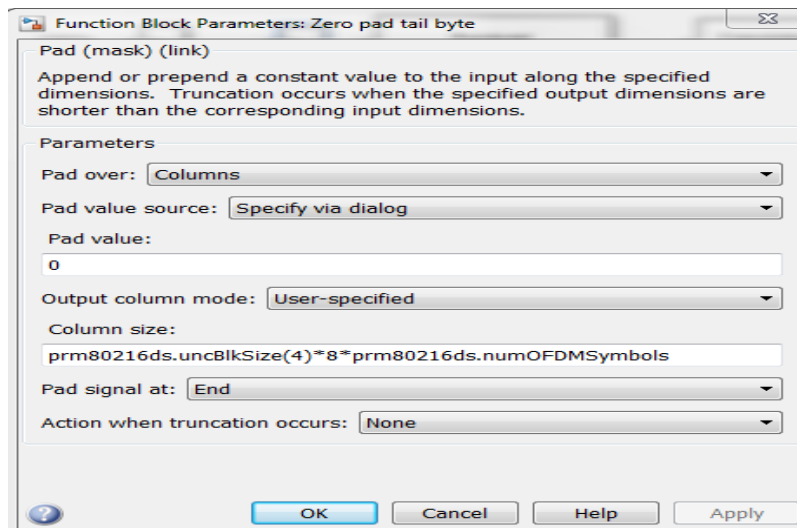
Состав блока модулятора 64QAM 3/4:



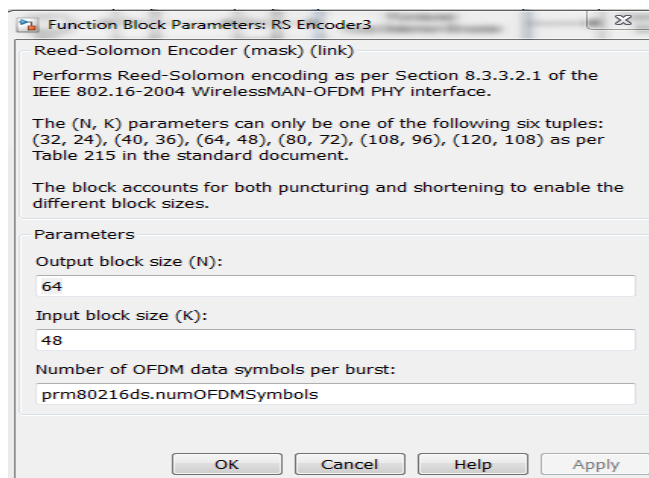
### Состав блока модулятора «64QAM 3/4»

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.

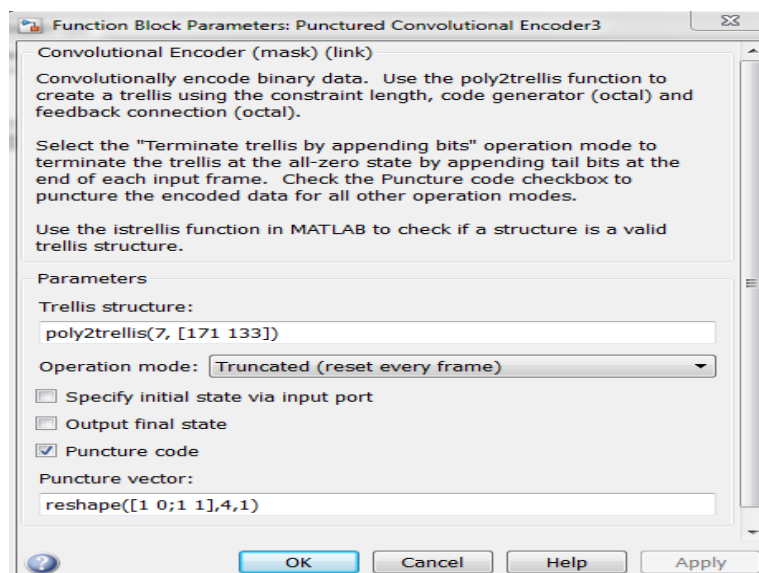
В каждом из блоков используется одинаковая последовательность блоков, отличающихся своими параметрами. Например для блока «16QAM 1/2» блоки имеют параметры.



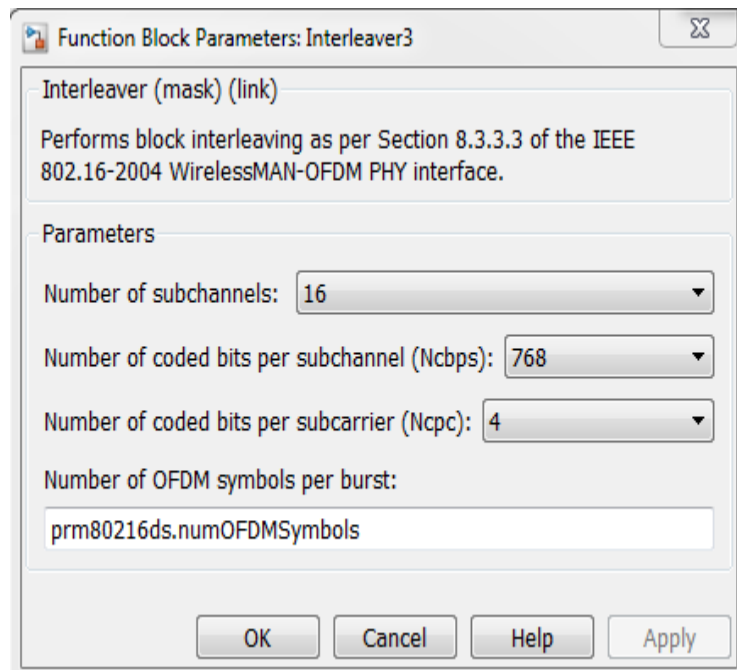
Состав блока «Zero pad tail byte 16QAM 1/2»



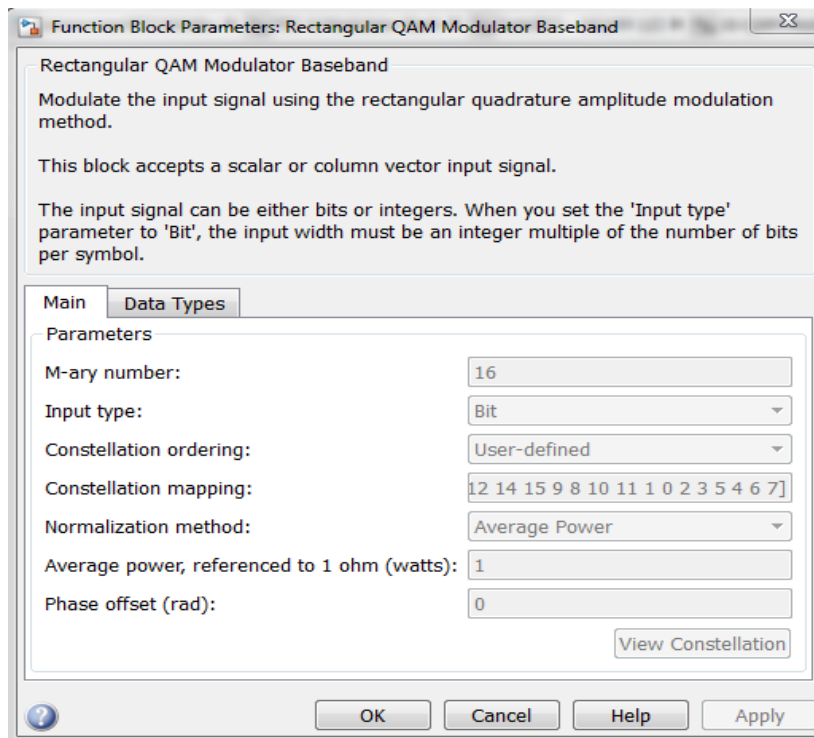
Состав блока кодера Рида-Соломона «Puncured Reed-Solomon Encoder 16QAM 1/2»



Состав блока сверточного кодера «Convolutinal Encoder 16QAM 1/2»



Состав блока перемежителя «Interleaver 16QAM 1/2»



Состав блока модулятора «16-QAM Modulator 16QAM 1/2»

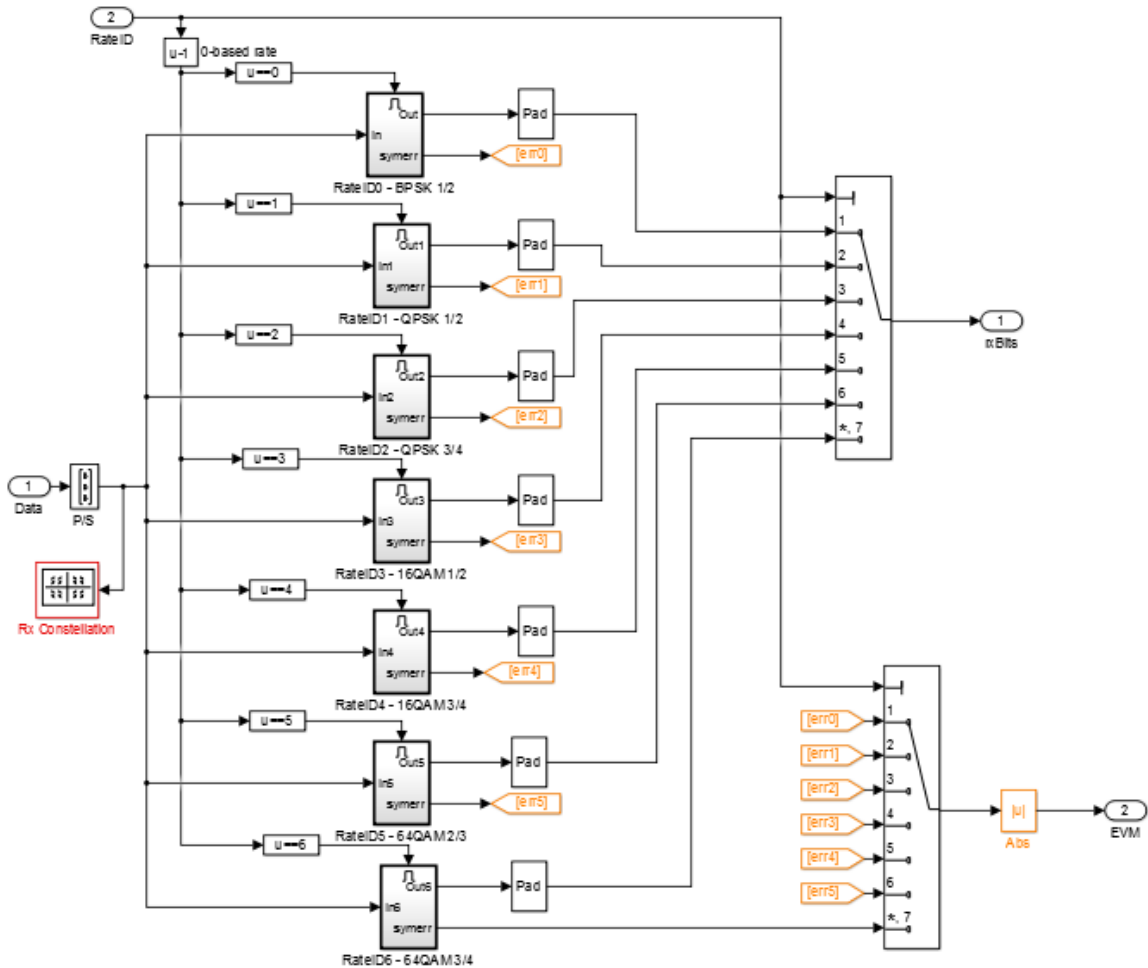
Таблица– Параметры кода Рида-Соломона для различных сигнально-кодовых конструкций

Вид модуляции	Общая скорость кодирования	Длина входной последовательности, бит	Длина выходной (кодированной) последовательности	Параметры кода Рида-Соломона, (n, k, d)



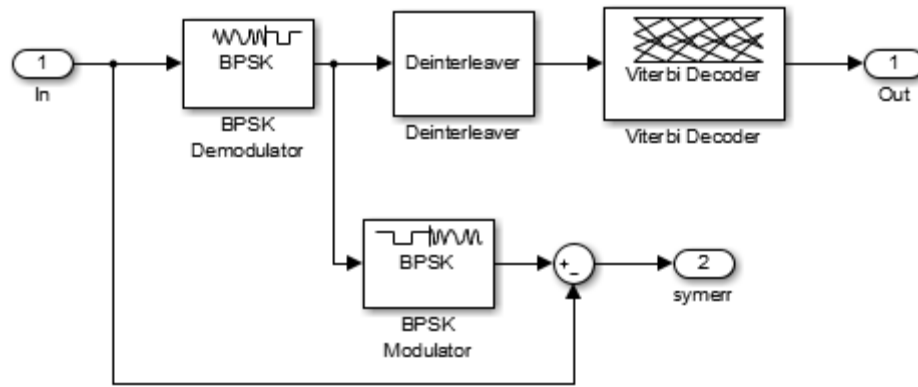
			ости, бит	
BPSK	1/2	12	24	(12,12,0)
QPSK	1/2	24	48	(32,24,4)
QPSK	3/4	36	48	(40,36,2)
16-QAM	1/2	48	96	(64,48,8)
16-QAM	3/4	72	96	(80,70,4)
64-QAM	2/3	96	144	(108,96,6)
64-QAM	3/4	108	144	(120,108,6)

Состав блока помехоустойчивого декодирования и демодуляции («Demodulator & FEC Bank»)



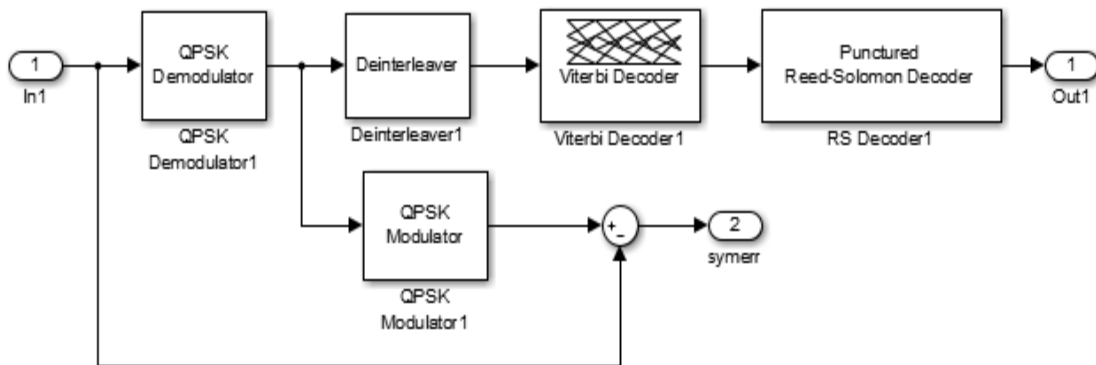
Состав блока декодирования и демодуляции («Demodulator & FEC Bank»)

Состав блока BPSK 1/2 демодулятора



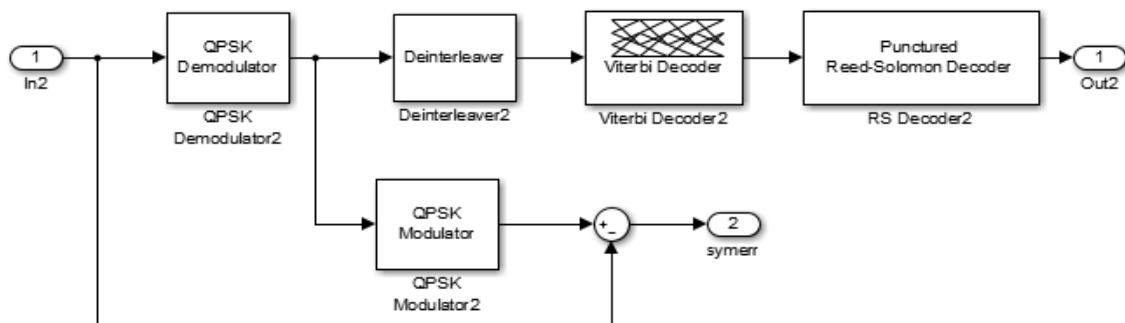
Состав блока демодулятора «BPSK»

Состав блока QPSK 1/2 демодулятора



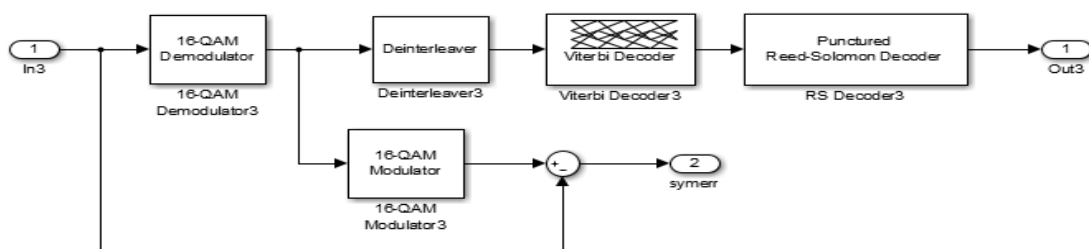
Состав блока демодулятора «QPSK 1/2»

Состав блока QPSK 3/4 демодулятора



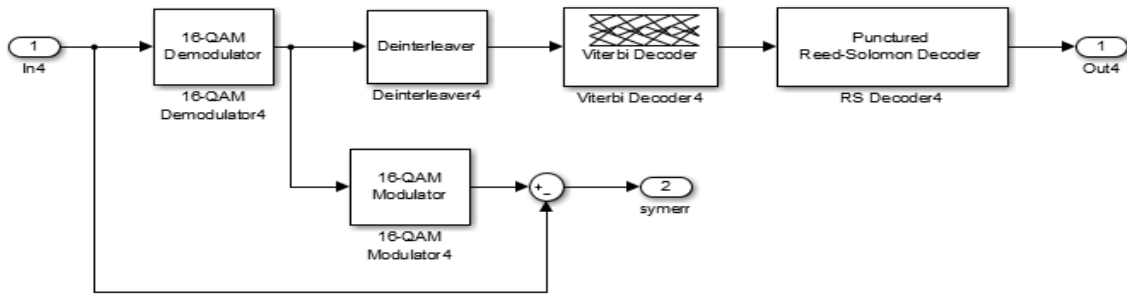
Состав блока демодулятора «QPSK 3/4»

Состав блока 16QAM 1/2 демодулятора



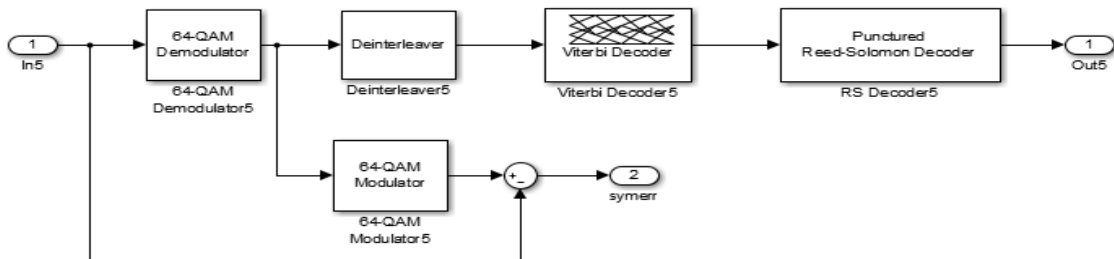
Состав блока демодулятора «16QAM 1/2»

### Состав блока 16QAM 3/4 демодулятора



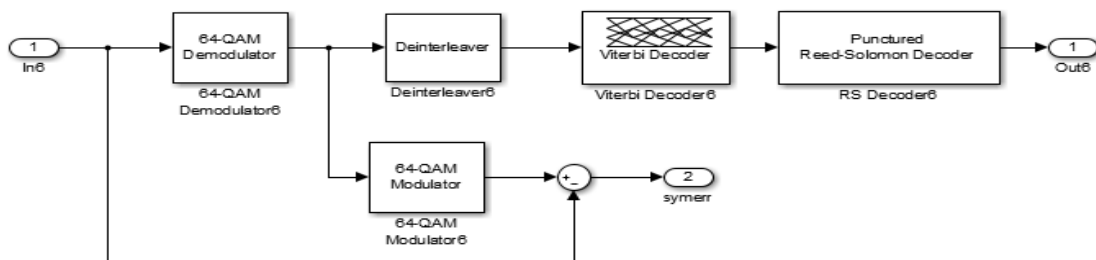
### Состав блока демодулятора «16QAM 3/4»

### Состав блока 64QAM 2/3 демодулятора



### Состав блока демодулятора «64QAM 2/3»

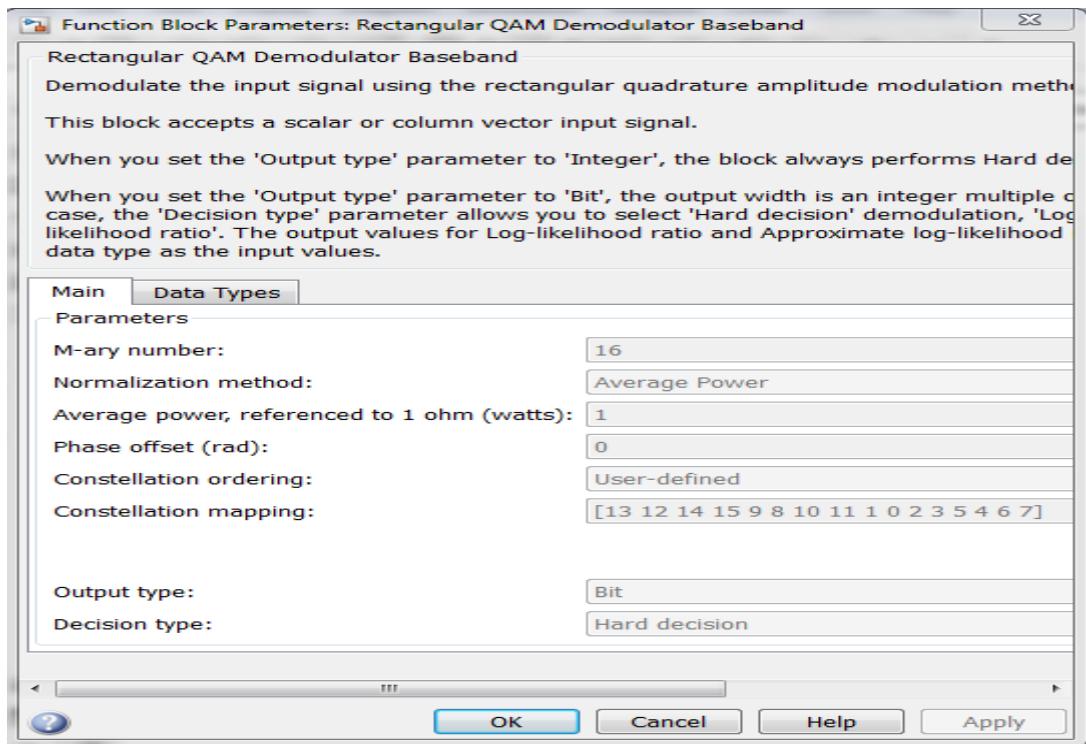
### Состав блока 64QAM 3/4 демодулятора



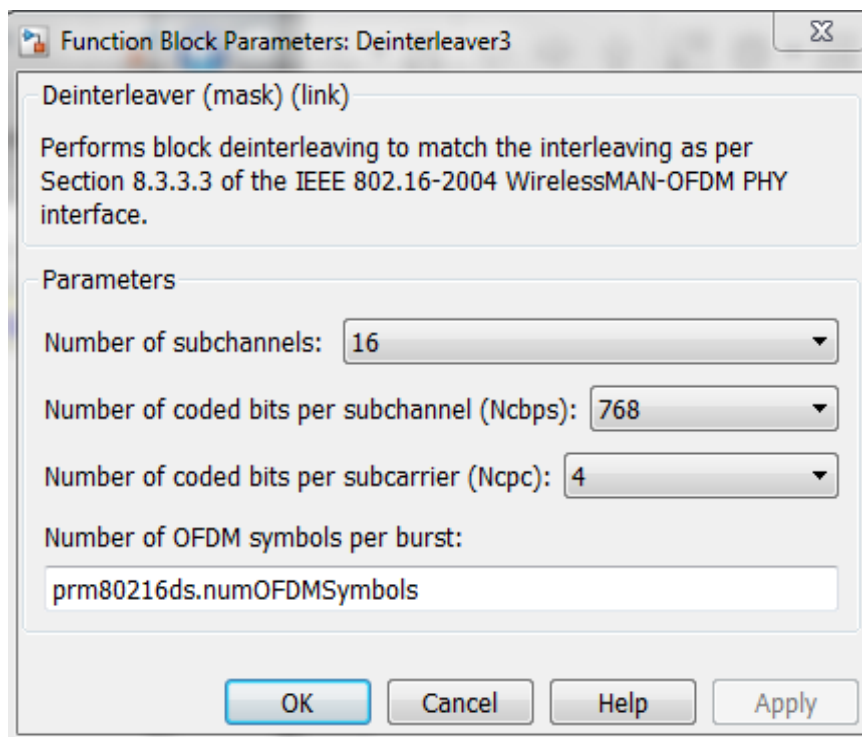
### Состав блока демодулятора «64QAM 3/4»

В процессе демодуляции и декодирования, описанные выше процессы, производятся в обратном порядке: демодуляция, дегеремеживание, декодирование сверточного кода по алгоритму Витерби, декодирования циклического блочного кода Рида-Соломона.

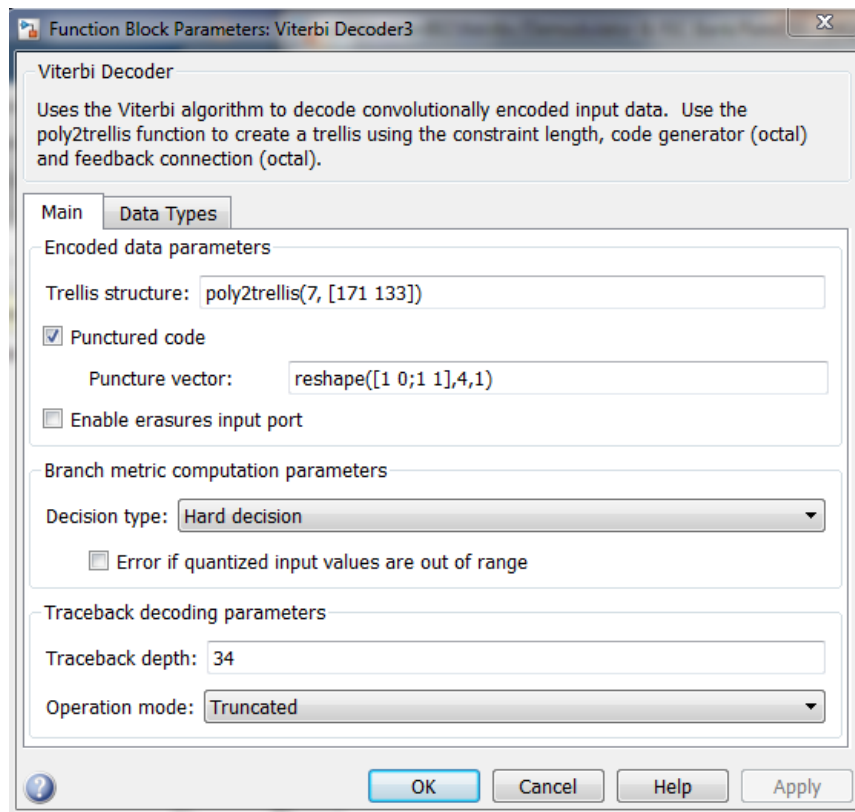
В каждом из блоков используется одинаковая последовательность блоков, отличающихся своими параметрами. Например для блока «16QAM 1/2» блоки имеют параметры.



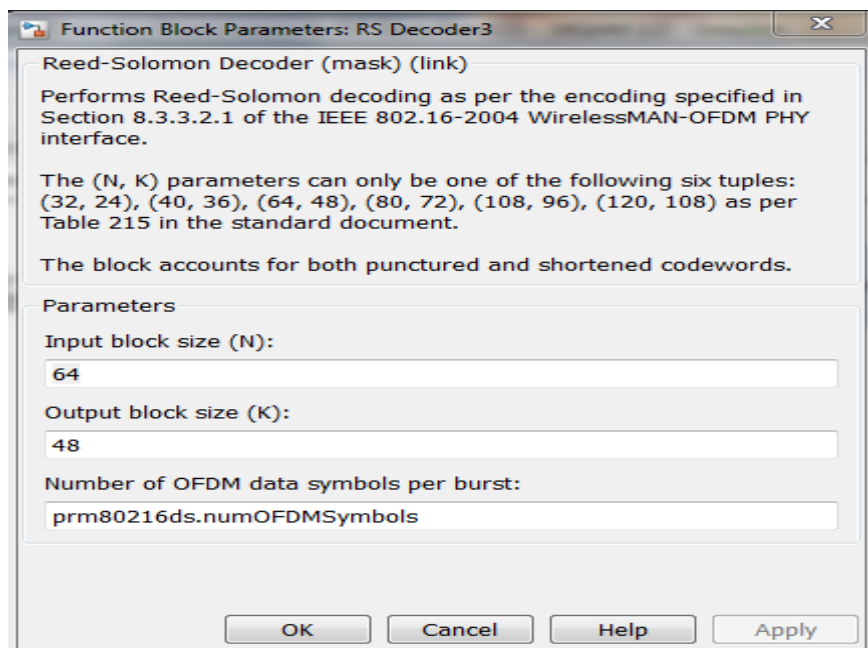
Состав блока демодулятора «16-QAM Modulator 16QAM 1/2»



Состав блока деперемежителя « Deinterleaver 16QAM 1/2»



Состав блока декодера Витерби «Viterbi Decoder 16QAM 1/2»



Состав блока декодера Рида-Соломона «RS Decoder 16QAM 1/2»

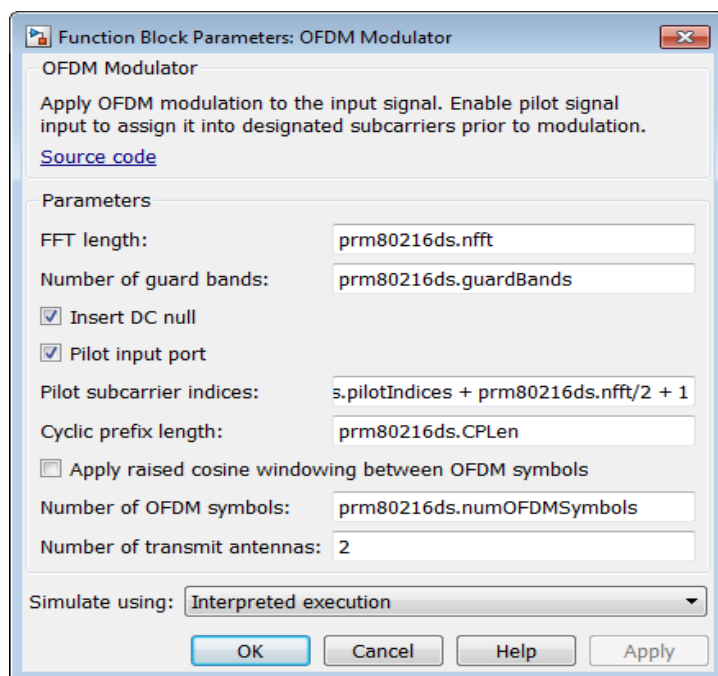
В каждый момент времени, используемый вид модуляции и скорость кодирования (R) адаптируются под условия передачи. Блок «Adaptive Rate Control» анализирует уровень SNR в приемном устройстве и устанавливает параметры в соответствии с таблицей

Таблица– Изменение параметров модуляции и кодирования в зависимости от SNR

Вид модуляции	Отношение сигнал/шум в
---------------	------------------------

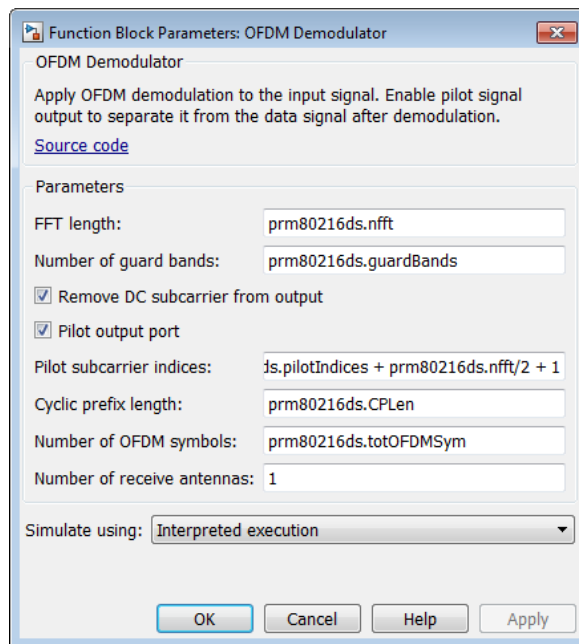
и кодирования	скорость	приемнике
BPSK		SNR < 4 дБ
QPSK, R=1/2		4 дБ < SNR < 10 дБ
QPSK, R=3/4		10 дБ < SNR < 12 дБ
16-QAM, R=1/2		12 дБ < SNR < 19 дБ
16-QAM, R=3/4		19 дБ < SNR < 22 дБ
64-QAM, R=1/2		22 дБ < SNR < 28 дБ
64-QAM, R=3/4		SNR > 28 дБ

Параметры OFDM-модулятора (блок «OFDM Modulator», рисунок 3.30).



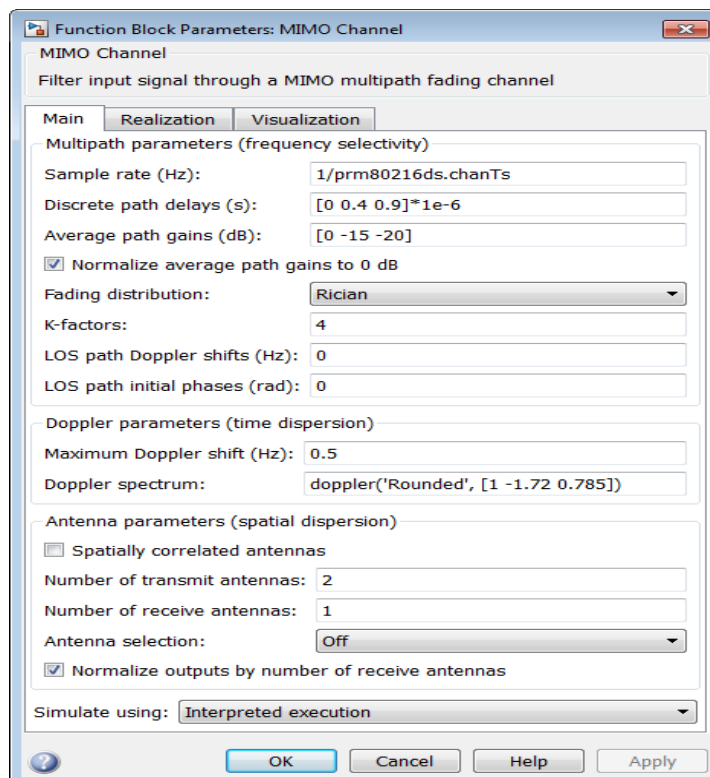
Параметры системы, изменяемые в блоке «OFDM Modulator»

Параметры OFDM-демодулятора (блок «OFDM Demodulator»).



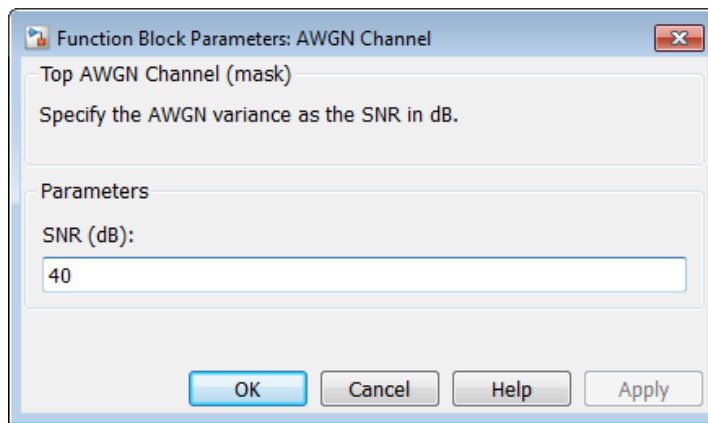
Параметры системы, изменяемые в блоке «OFDM Demodulator»

Параметры канала MIMO (блок «MIMO Channel»).



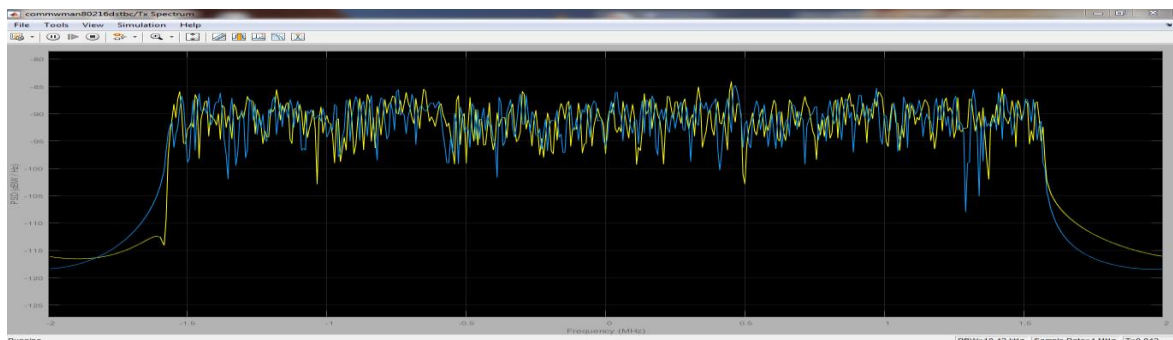
Параметры системы, изменяемые в блоке «MIMO Channel»

Параметры канала AWGN (блок «AWGN Channel»).

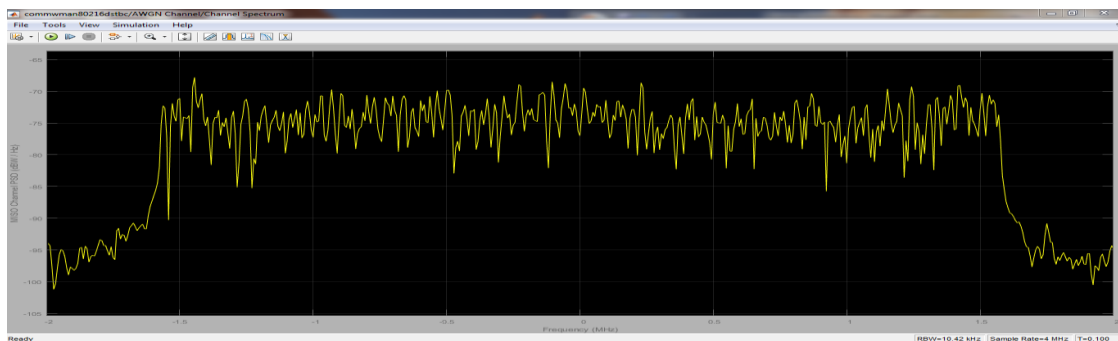


Параметры системы, изменяемые в блоке «AWGN Channel»

### Результаты работы и их анализ



Спектр передаваемых сигналов, поступающих на соответствующую передающую антенну

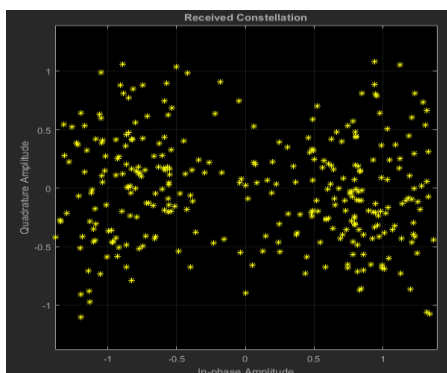


Спектр принимаемого сигнала

Как было описано ранее, система адаптируется к условиям передачи, изменяя вид сигнально-кодированной конструкции сигнала. Необходимо исследовать поведение системы в зависимости от SNR в канале передачи (блок AWGN Channel), оформить полученные значения в виде графиков.

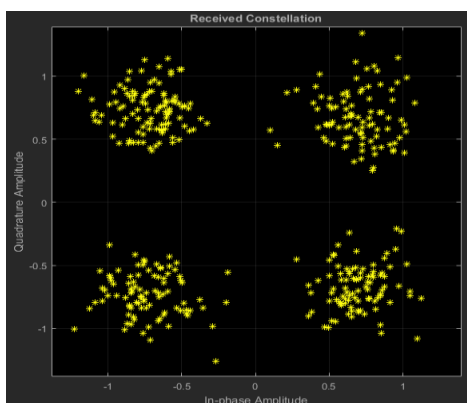
Созвездие принимаемого сигнала (BPSK):





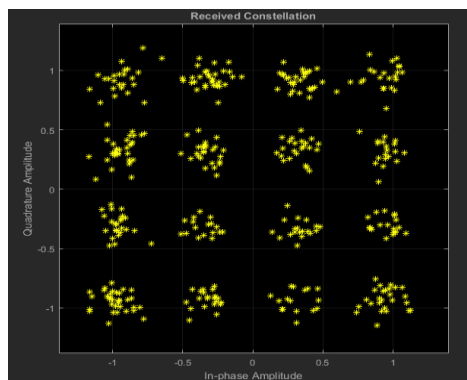
Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 2)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-4):



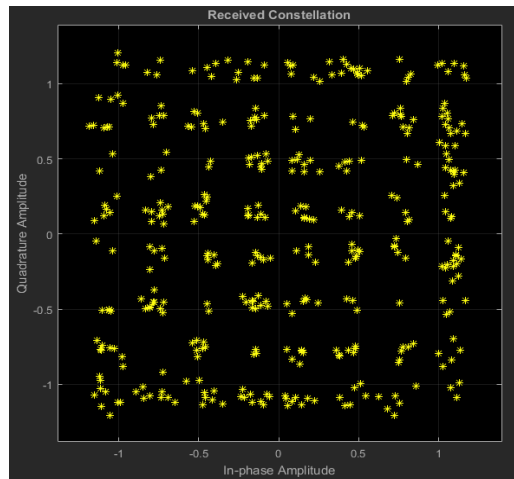
Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 11)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-16):



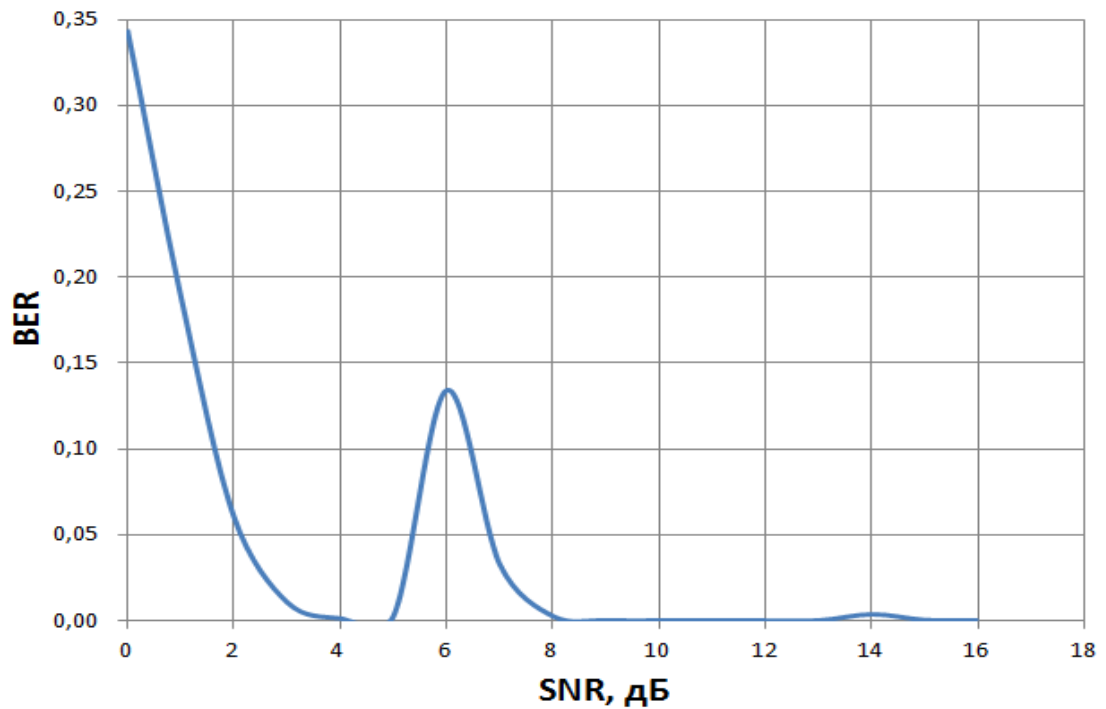
Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 18)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-64):



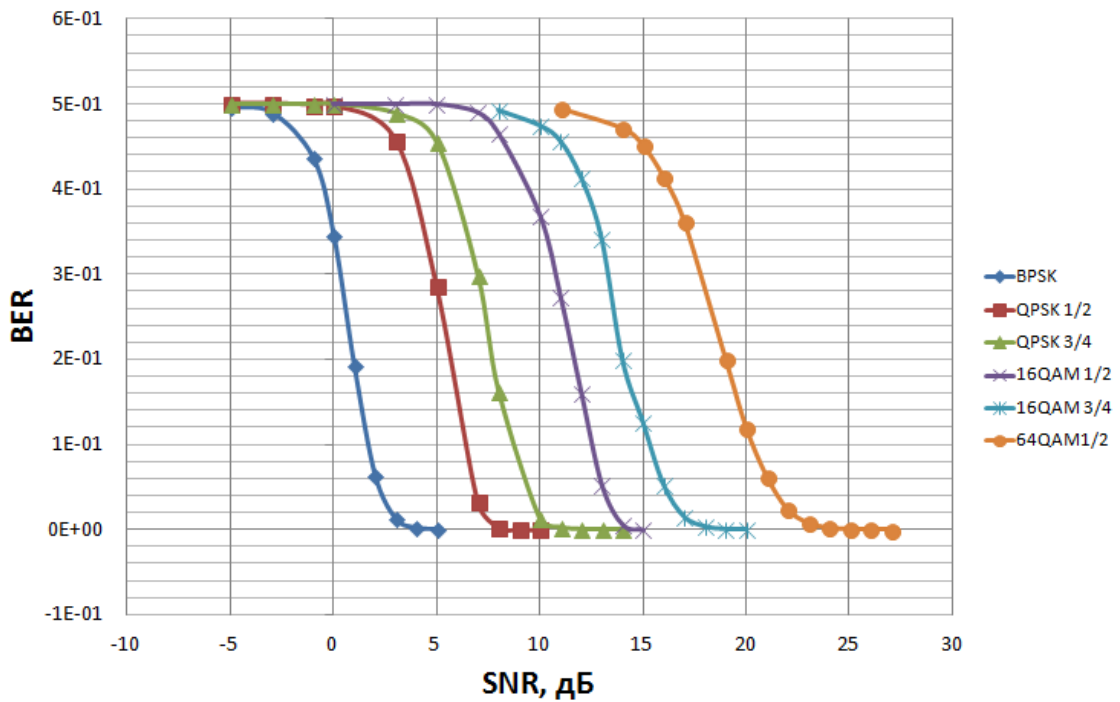
Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 22)

По данным блока «Bit Error Rate Display» можно построить график зависимости битовой вероятности ошибки (BER) от отношения сигнал/шум в канале.



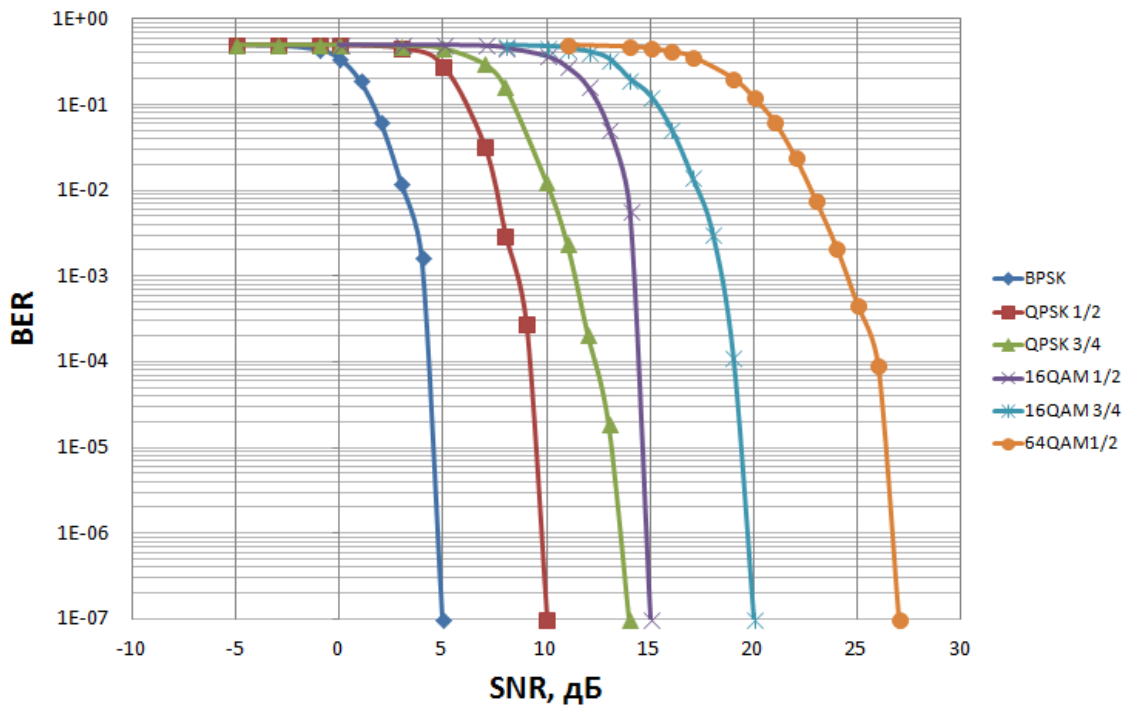
Зависимость BER от SNR при использовании адаптивного изменения параметров

Зависимости BER от SNR для каждого конкретного вида модуляции и скорости кодирования представлены на рисунке.



Графики зависимости BER от SNR для отдельных видов модуляции и скорости кодирования

Та же зависимость в логарифмическом масштабе:



Графики зависимости BER от SNR для отдельных видов модуляции и скорости кодирования. Логарифмическая шкала

Переход с одного вида модуляции на другой требует большей энергии сигнала, но взамен происходит значительное увеличение скорости передачи. На рисунке представлена зависимость принятого количества бит за 1 секунду (скорость передачи в Мбит/с) от SNR в

канале.

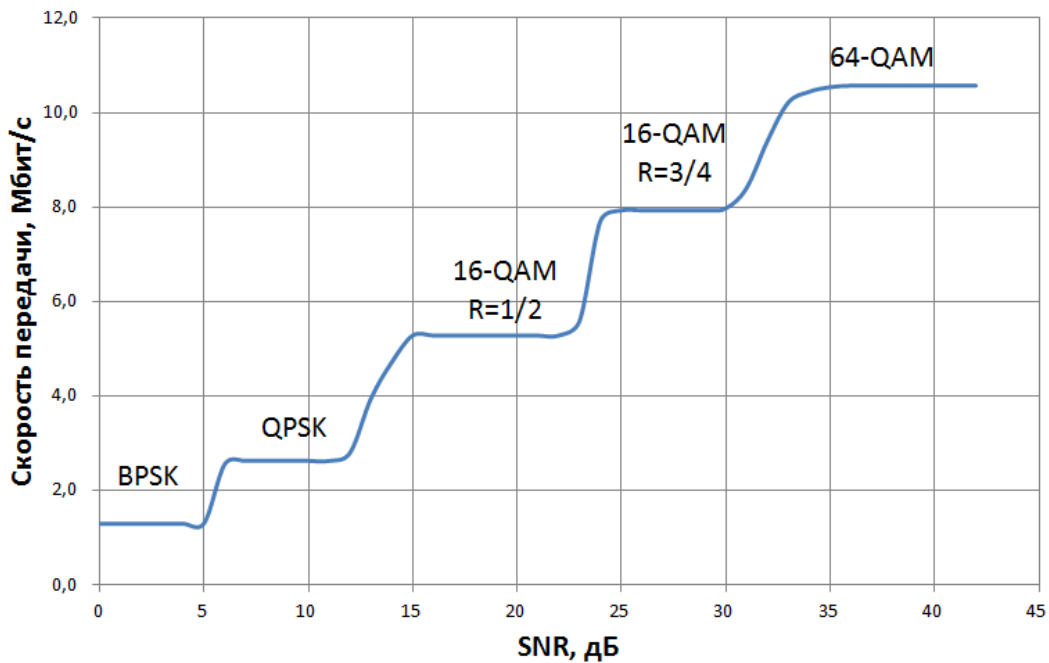


График зависимости скорости передачи от SNR

После демодуляции и декодирования производится оценка SNR для принятых данных (блок «SNR Estimation»). Зависимость оцененного SNR от SNR в канале передачи приведена на рисунке

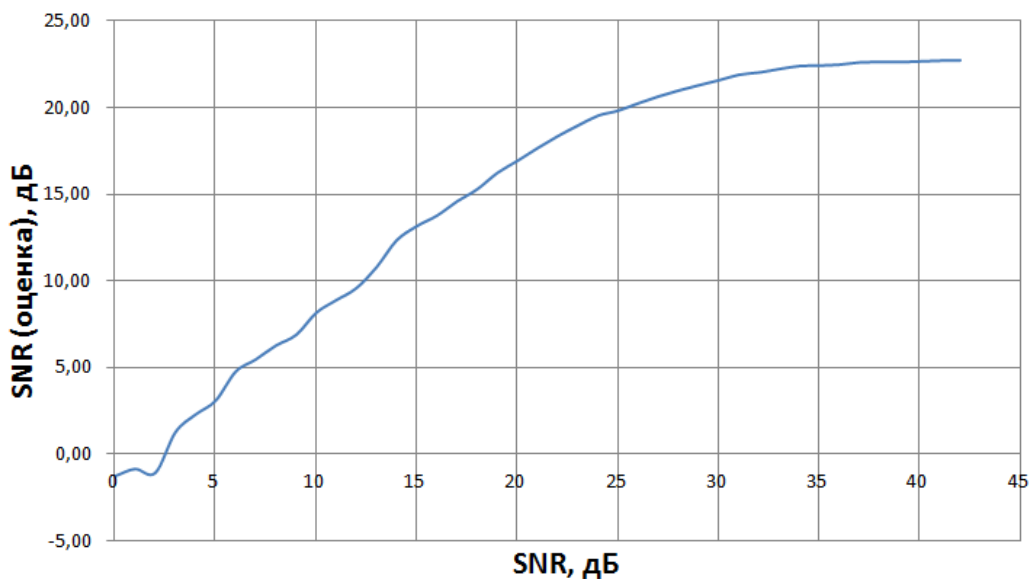


График зависимости оценки SNR от SNR в канале передачи

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.

## 9.СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ LTE

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:

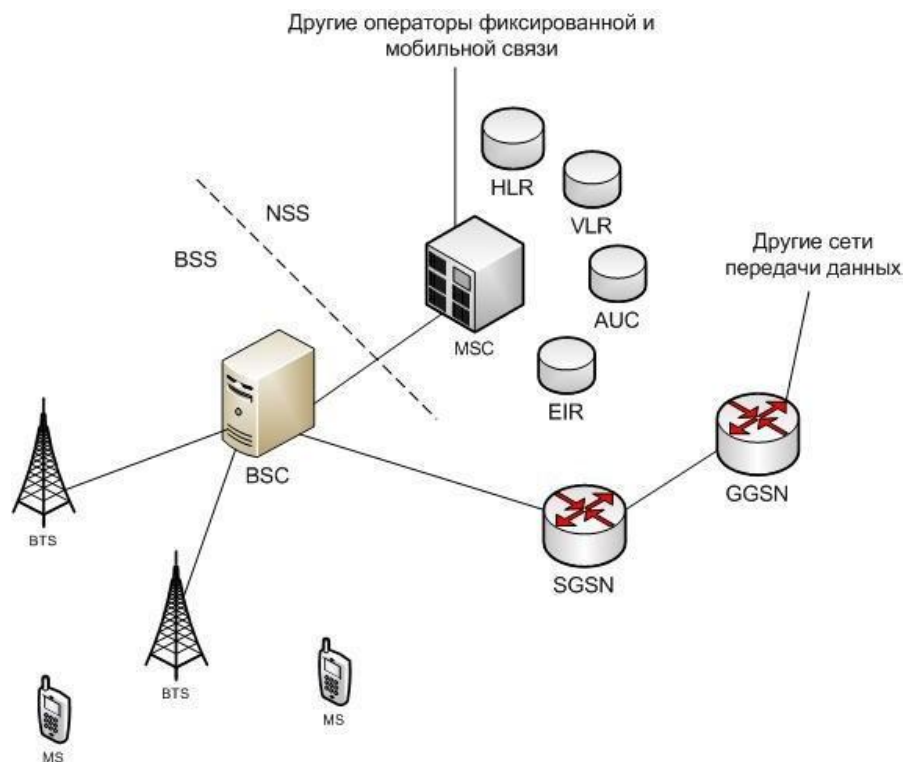


Рис. 9.1. Структура сети стандарта 2G (GSM)

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 радиointерфейсу. 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.

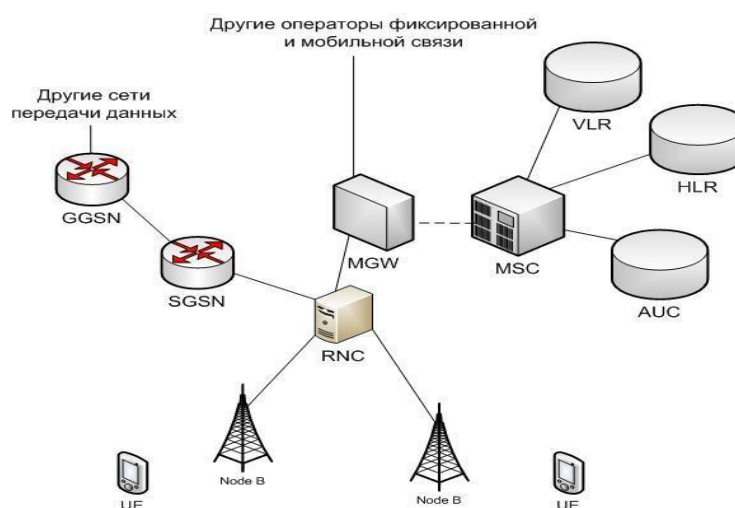


Рис. 9.2. Структура сети стандарта 3G (UMTS)



### **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:

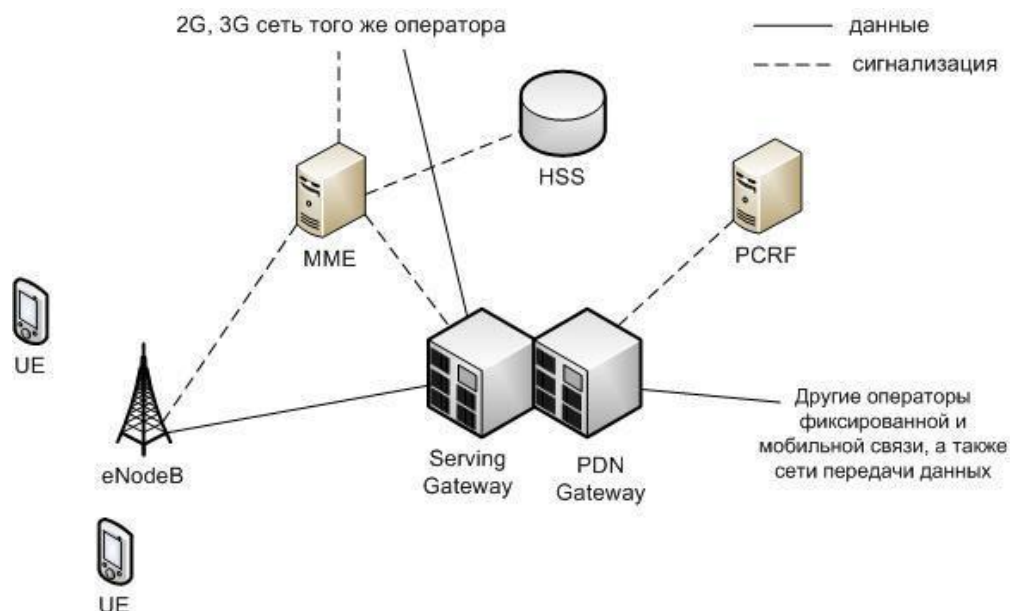


Рис. 9.3. Структура сети стандарта LTE

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.

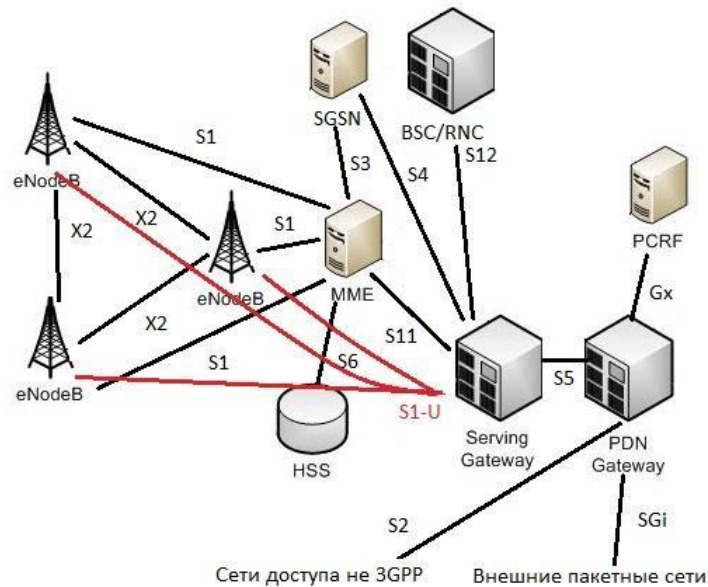


Рис. 9.4. Интерфейсы сети стандарта LTE

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.

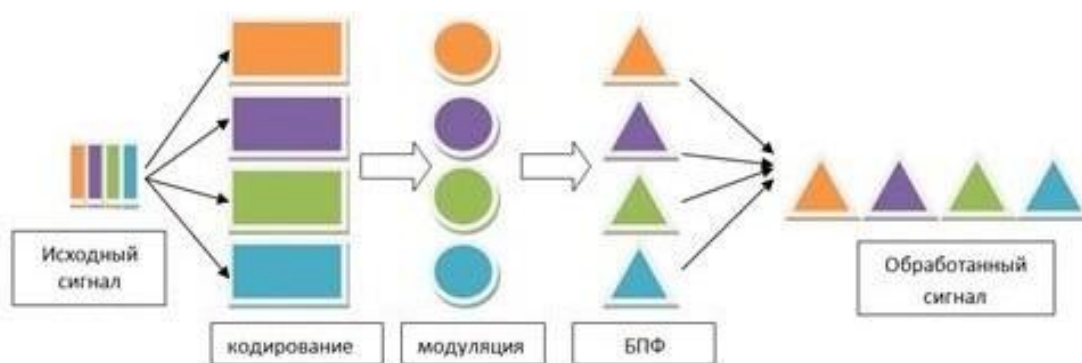


Рис. 9.5. OFDM – модулятор

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.

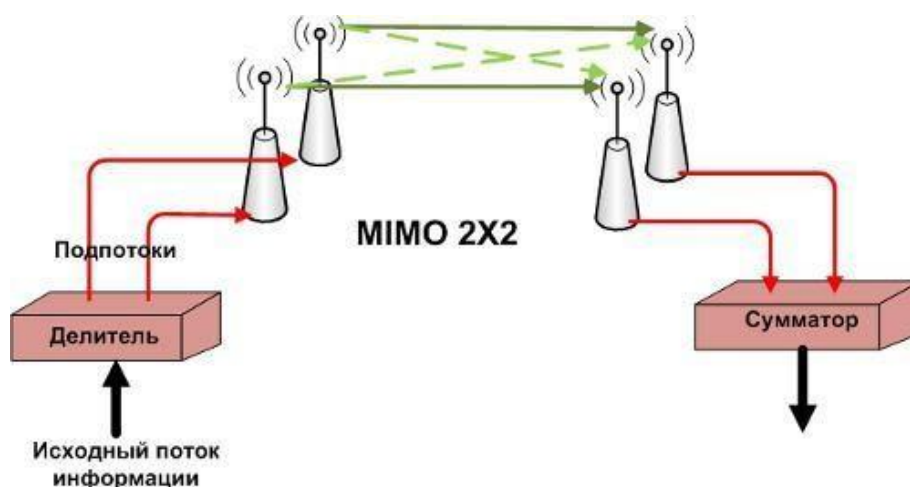


Рис. 9.6. MIMO 2x2

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 свыше 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.

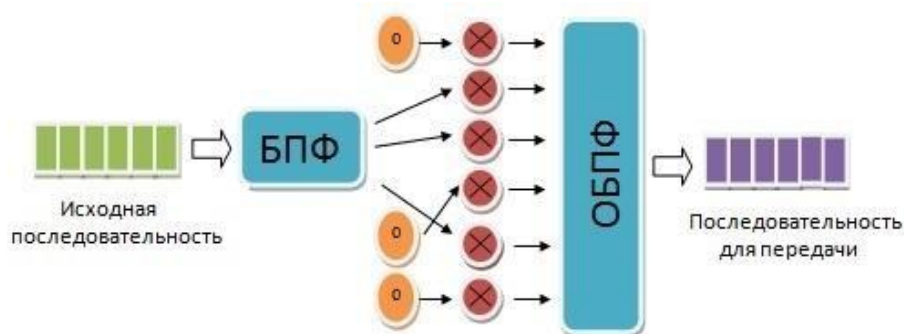


Рис. 9.7. SC-FDMA – модулятор

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. 9.8. 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 (МС) от eNodeB (БС).

□ 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 (МС) и сетью в процедурах начального доступа UE (МС) 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. 9.9. Транспортные каналы LTE



Рассмотрим виды транспортных каналов на радиointерфейсе сети стандарта LTE. Все транспортные каналы можно классифицировать по направлению передачи: Uplink (от UE (MC) к eNodeB (BC)) и Downlink (от eNodeB (BC) к UE (MC)).

**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.

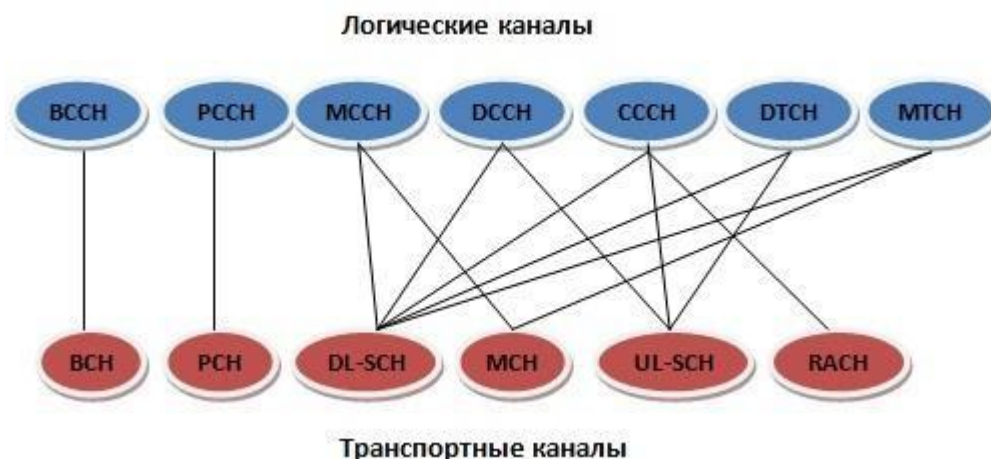


Рис. 9.10. Связь логических и транспортных каналов

**Физические каналы на радиointерфейсе в LTE**

Информация между UE (MC) и eNodeB (BC) передается не произвольным образом, а через четко организованную структуру каналов. Рассмотрим классификацию, виды и назначение физических каналов в сети LTE.



Рис. 9.11. 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 (MC).
- CCPCH (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 (MC) 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.

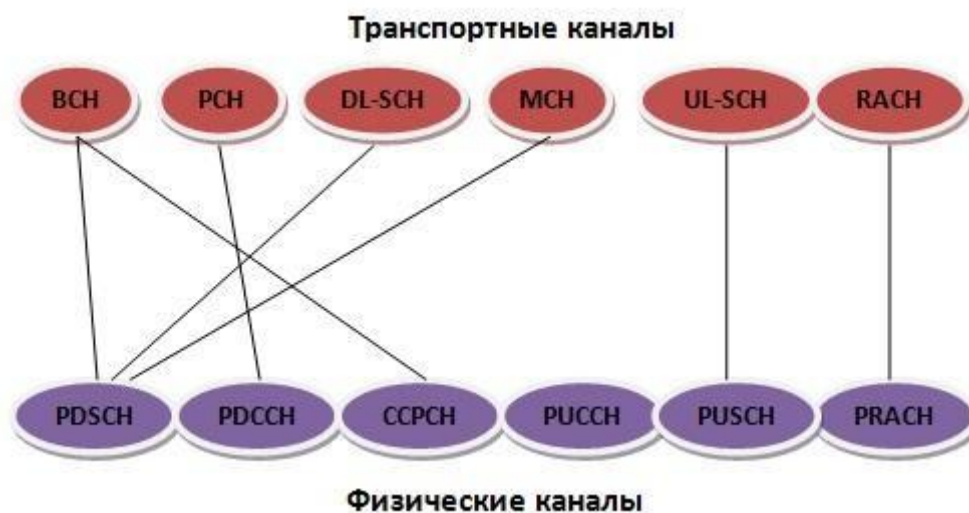


Рис. 9.12. Связь физических и транспортных каналов

**Основные параметры LTE**

Таблица 9.1. 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

Как было сказано выше, на практике будет реализован канал Downlink системы мобильной связи стандарта LTE. Структура данного канала представлена на рисунке 5.107.

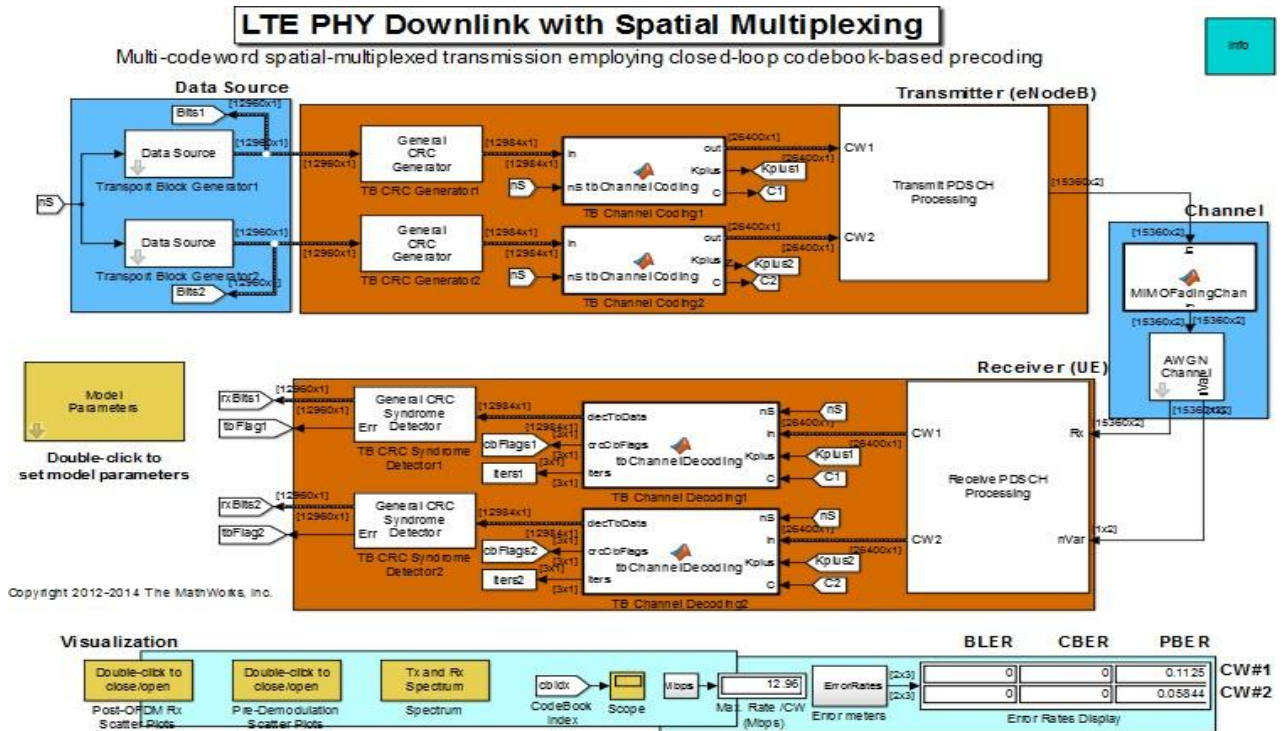


Рис. 9.13. Канал Downlink LTE Simulink MATLAB 2015b

Рассмотрим более подробно данный канал.

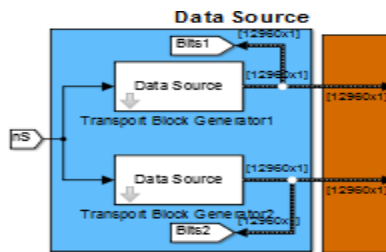


Рис. 9.14. Разделение исходного потока бит на параллельные потоки

- 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.

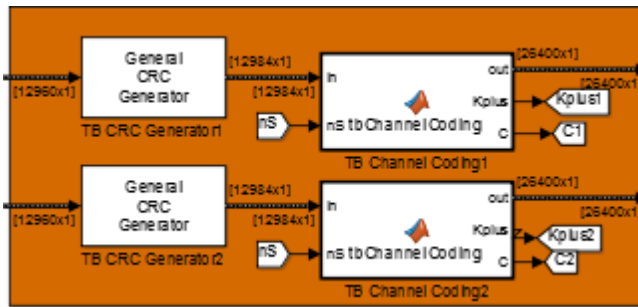


Рис. 9.15. Кодирование помехоустойчивым кодом

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 1 0 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. 9.16. 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.

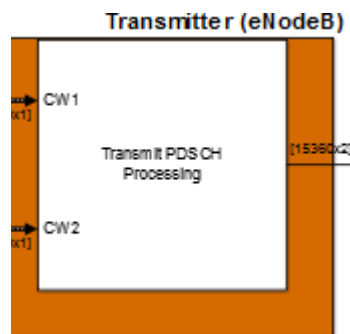


Рис. 9.17. Манипуляция выбранным в данный конкретный момент способом модуляции

Структура этого блока имеет следующий вид:

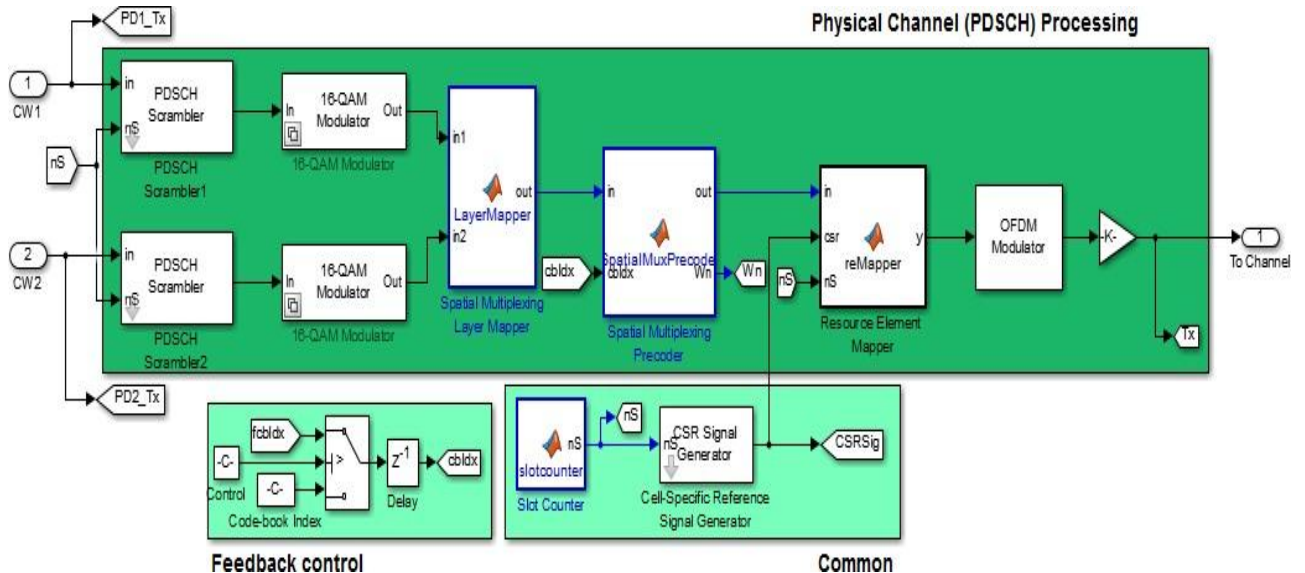


Рис. 9.18. Квадратурная манипуляция и получение OFDM символов

- 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).

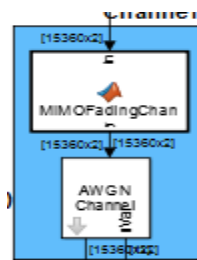


Рис. 9.19. Передача в эфир

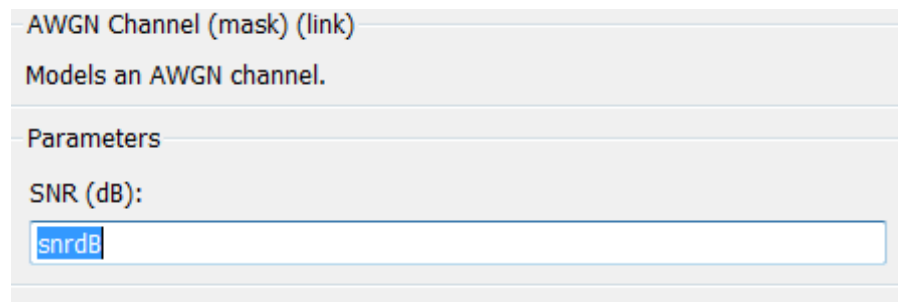


Рис. 9.20. Характеристики блока БГШ (AWGN)

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.



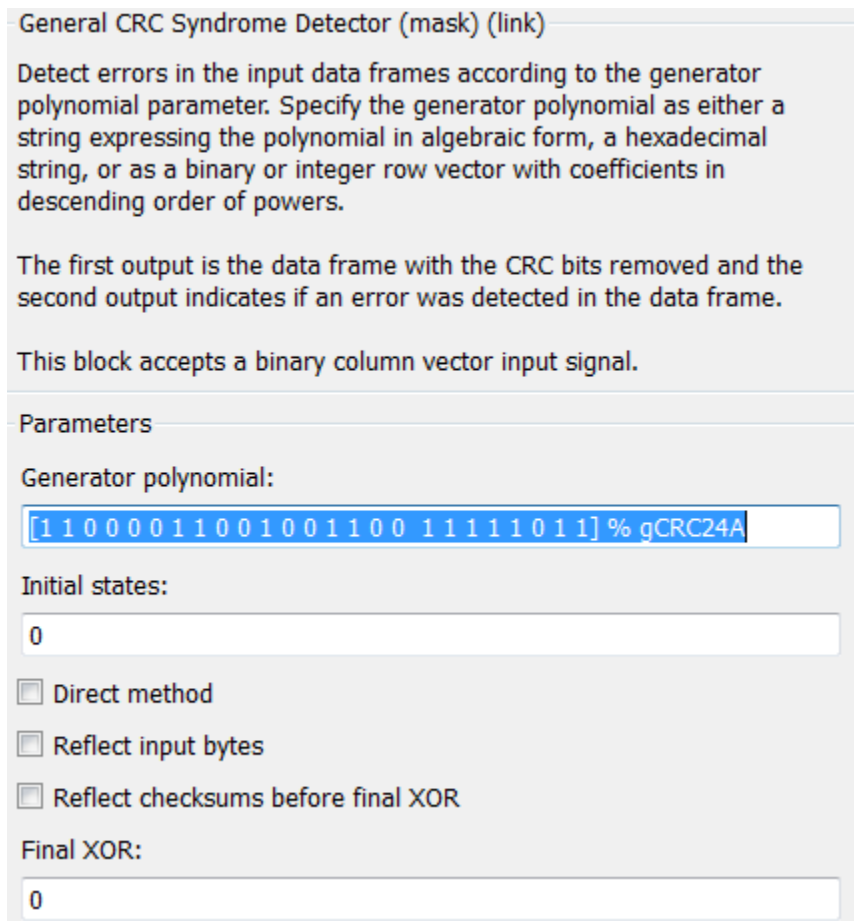


Рис. 9.24. Характеристики декодера CRC

После декодирования производится преобразование параллельных потоков в один исходный поток:



Рис. 9.25. Получение исходного потока

Данная схема позволяет формировать характеристики передачи данных по этому каналу, а именно это ширина спектра, количество антенн в MIMO, 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. 9.26. 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 MIMO).
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. 9.27. Информация о битовой вероятности ошибки параллельных потоков

В качестве примера зададим следующие характеристики передачи данных:

- Ширина спектра - 10 МГц.
- Количество антенн MIMO – 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. 9.28. Характеристики передачи данных

В результате получим следующие зависимости:

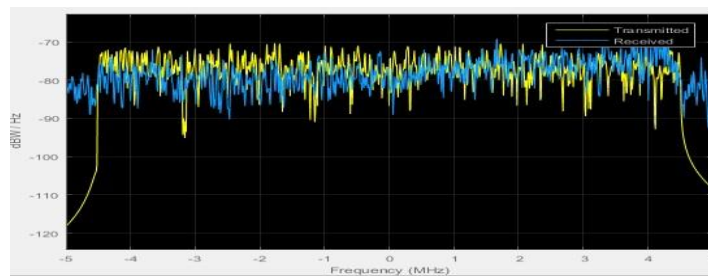


Рис. 9.29. Спектр входного (желтым) и выходного (синим) сигналов

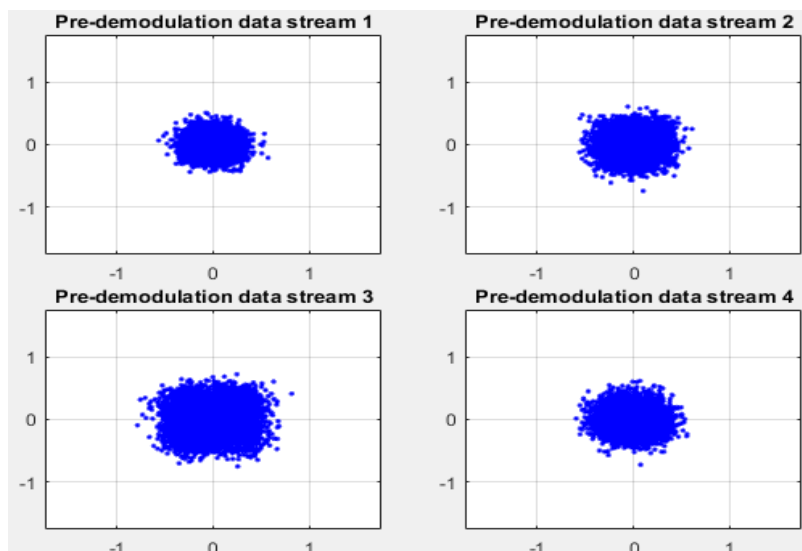


Рис. 9.30. Диаграмма созвездий переданного сигнала для каждой из антенн MIMO

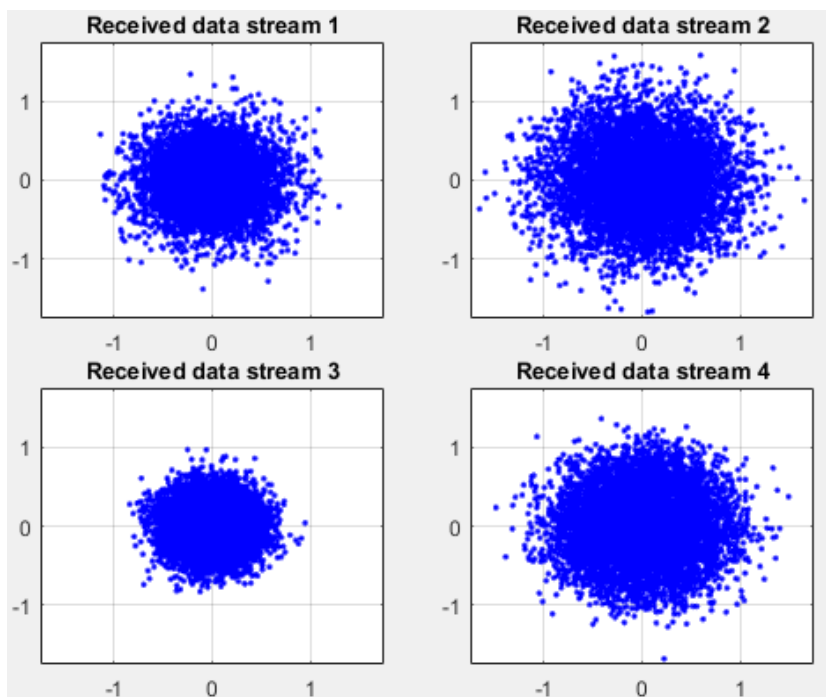


Рис. 9.31. Диаграмма созвездий принятого сигнала для каждой из антенн MIMO

На основании полученных значений, построим зависимость.

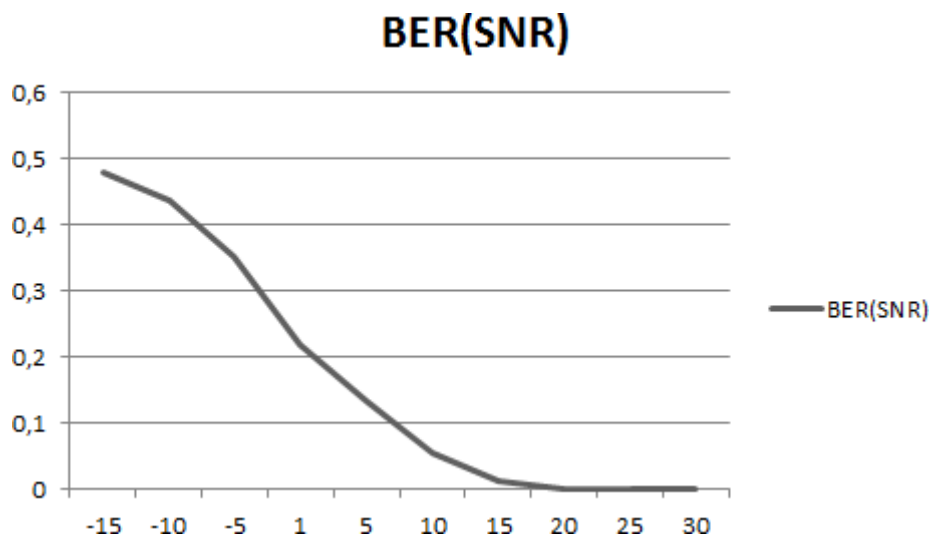


Рис. 9.32. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для первого потока

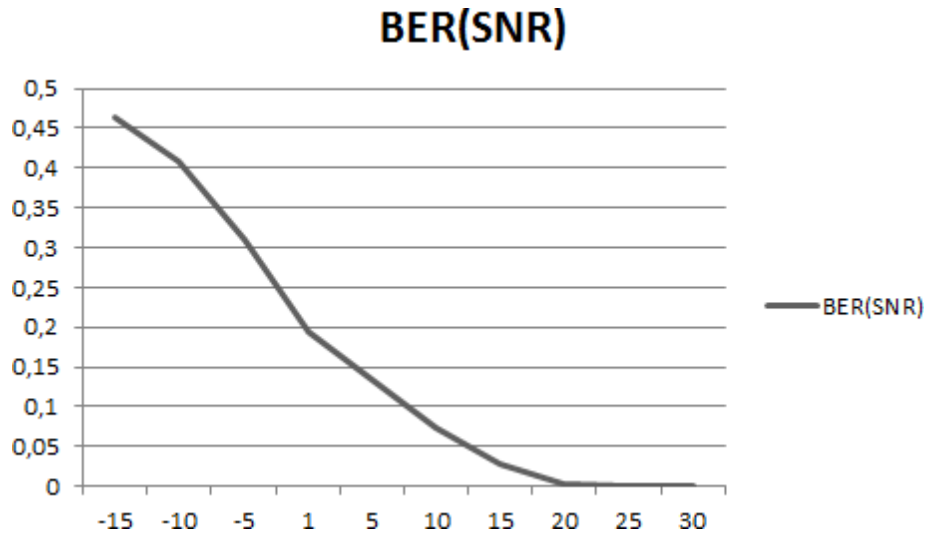


Рис. 9.33. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для второго потока

В качестве еще одного примера зададим следующие характеристики передачи данных:

- Ширина спектра - 10 МГц.
- Количество антенн MIMO – 2x2.
- 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: 2x2

PDSCH modulation type: QPSK

Target coding rate:  
1/2

Fading channel model: EPA 0Hz

SNR (dB):  
1

Enable PMI feedback

Maximum decoding iterations:  
8

Disable transport-block level early termination

Рис. 9.34. Характеристики передачи данных

В результате получим следующие зависимости:

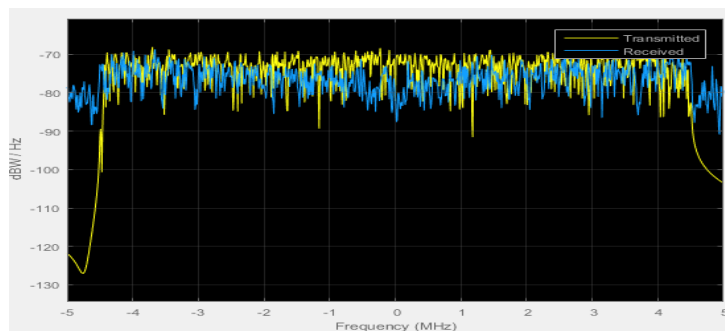


Рис. 9.35. Спектр входного (желтым) и выходного (синим) сигналов

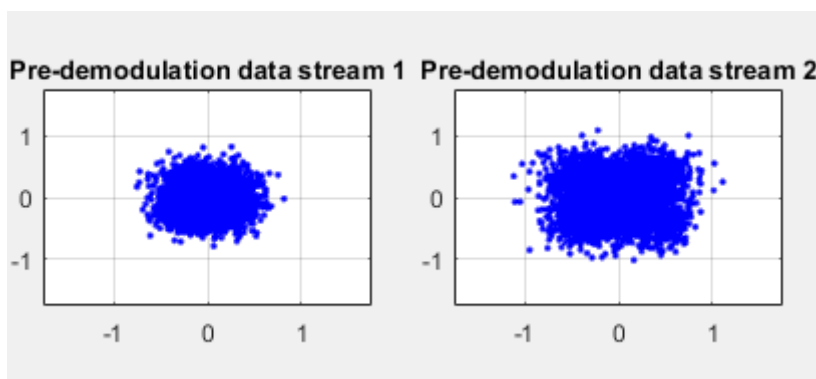


Рис. 9.36. Диаграмма созвездий переданного сигнала для каждой из антенн MIMO

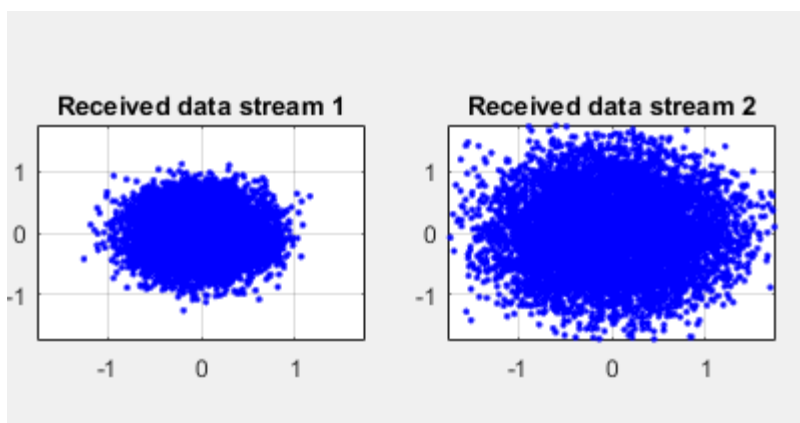


Рис. 9.37. Диаграмма созвездий принятого сигнала для каждой из антенн MIMO

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.

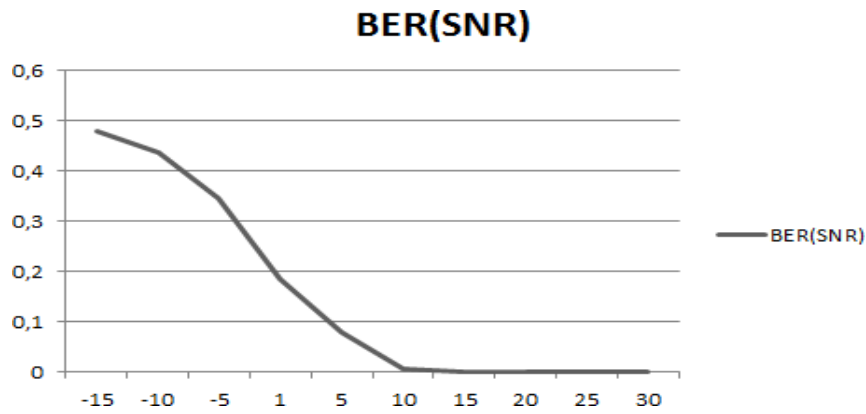


Рис. 9.38. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для первого потока

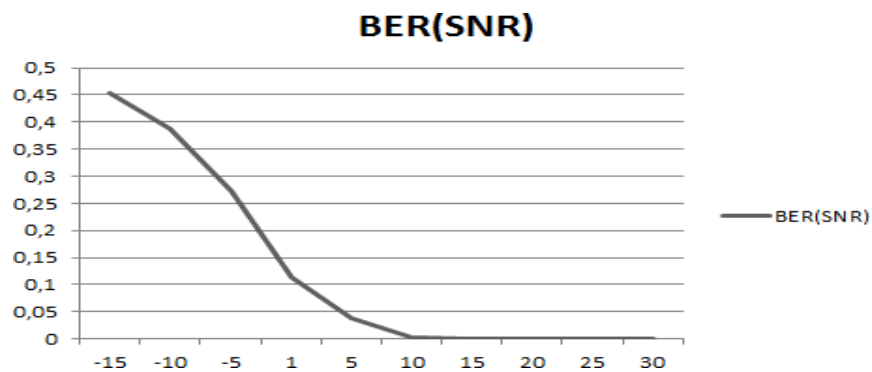


Рис. 9.38. Зависимость битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для второго потока

### Методика и проведение исследования канала Downlink

Запустить Matlab 15 от имени администратора (обязательно). В результате запуска на экране монитора появится следующее окно:

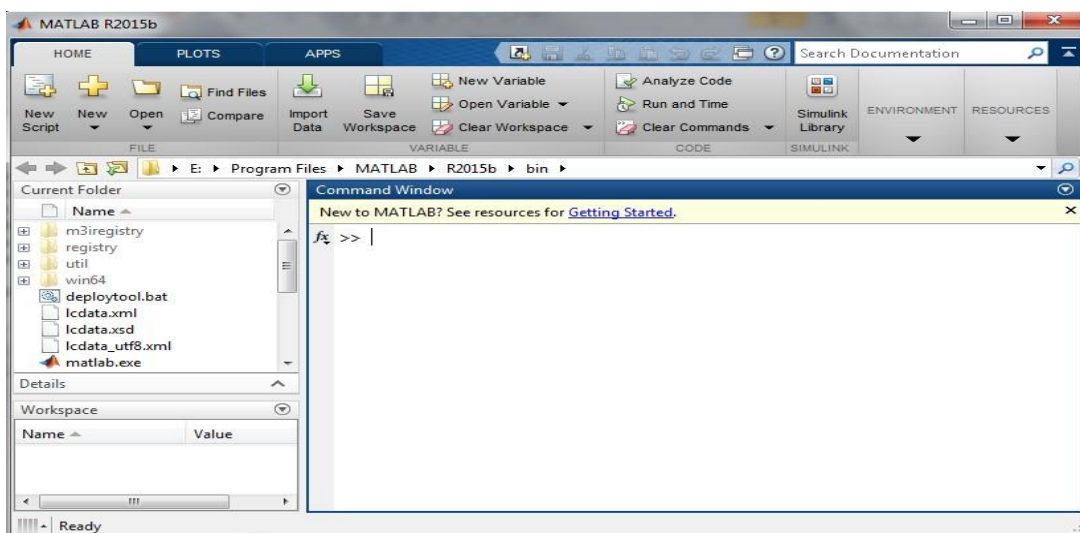


Рис. 9.39. Диалоговое окно Matlab 15

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:

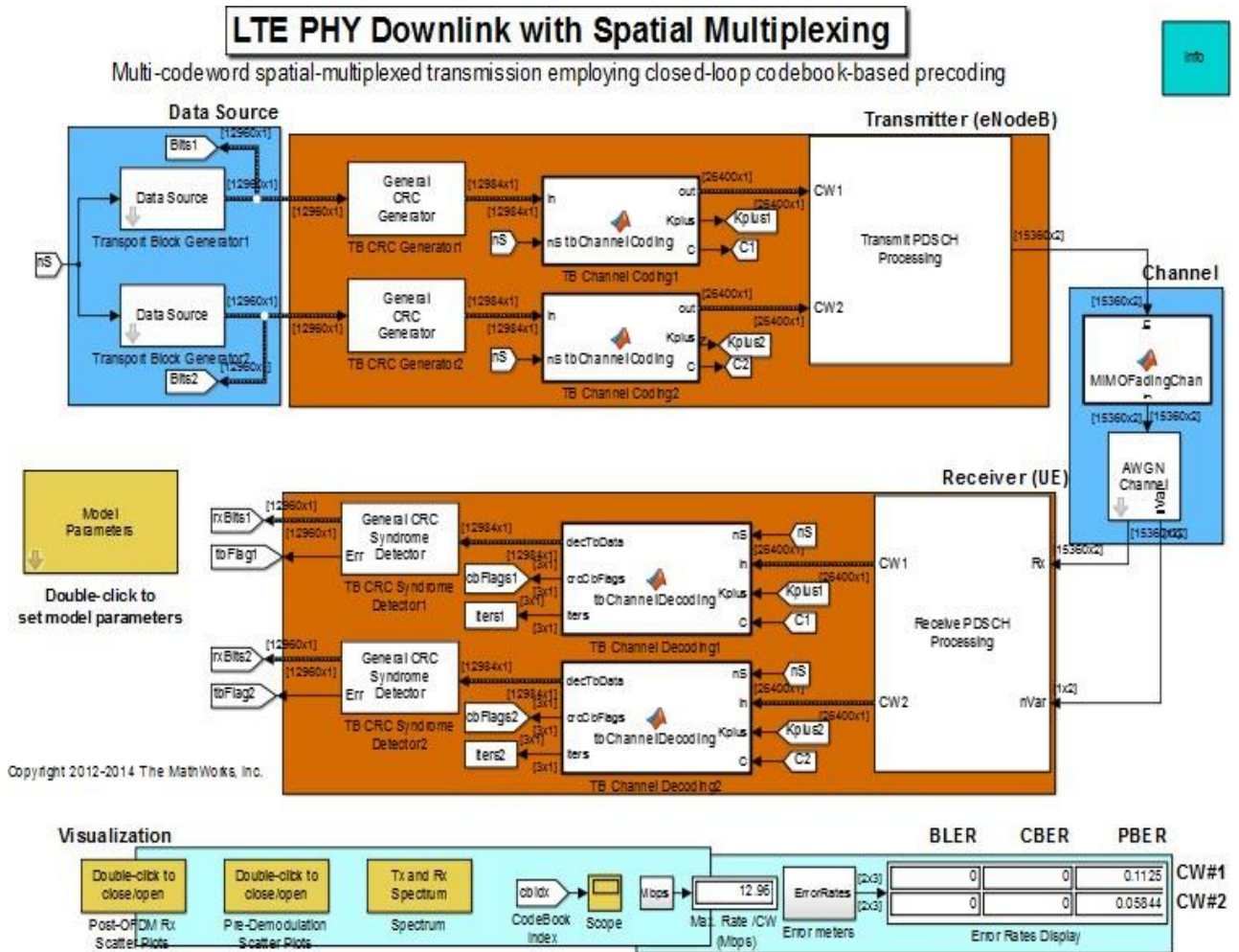


Рис. 9.40. Схема канала Downlink

3. Задать следующие характеристики передачи данных:

- Модуляция – QAM-16.
- Количество антенн MIMO 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 MIMO 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 9.2. 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



Таблица 9.3. 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.

## **10. СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО НАЗЕМНОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ DVB-T И DVB-T2**

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.

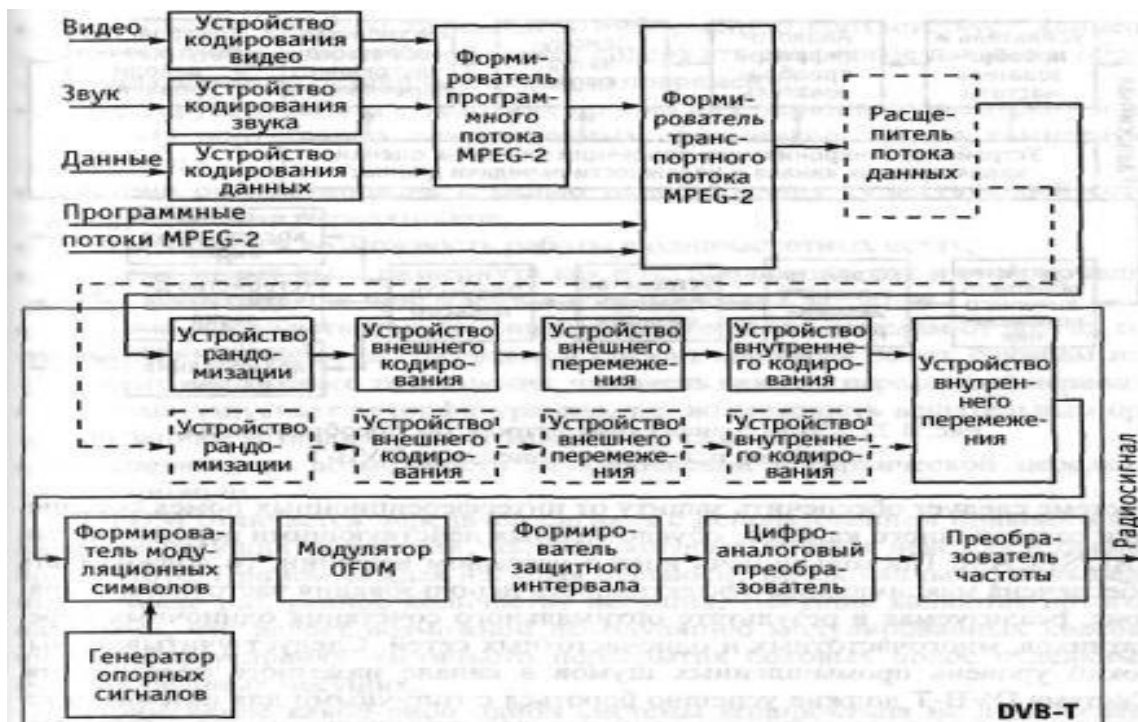


Рис. 10.1. Структурная схема передатчика системы DVB-T

На приемной стороне выполняются операции, обратные операциям производимым в приемнике.



Рис. 10.2. 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. 10.3. 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. 10.4. 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.

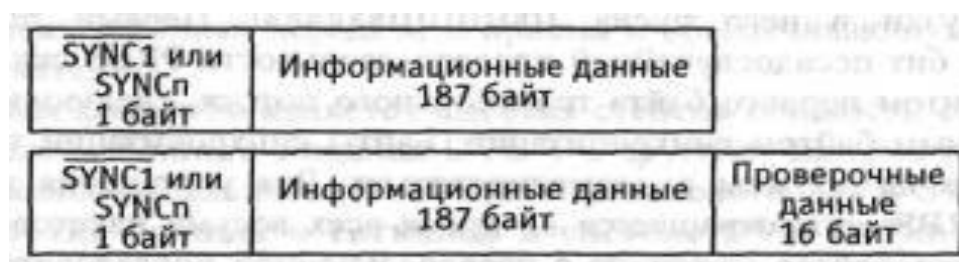


Рис. 10.5. Структурная схема устройства рандомизации данных

Внешнее перемежение осуществляется путем изменения порядка следования байт в пакетах, защищенных от ошибок. В соответствии со схемой представленной на слайде перемежение 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 проблемы синхронизации



Рис. 10.6. 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:

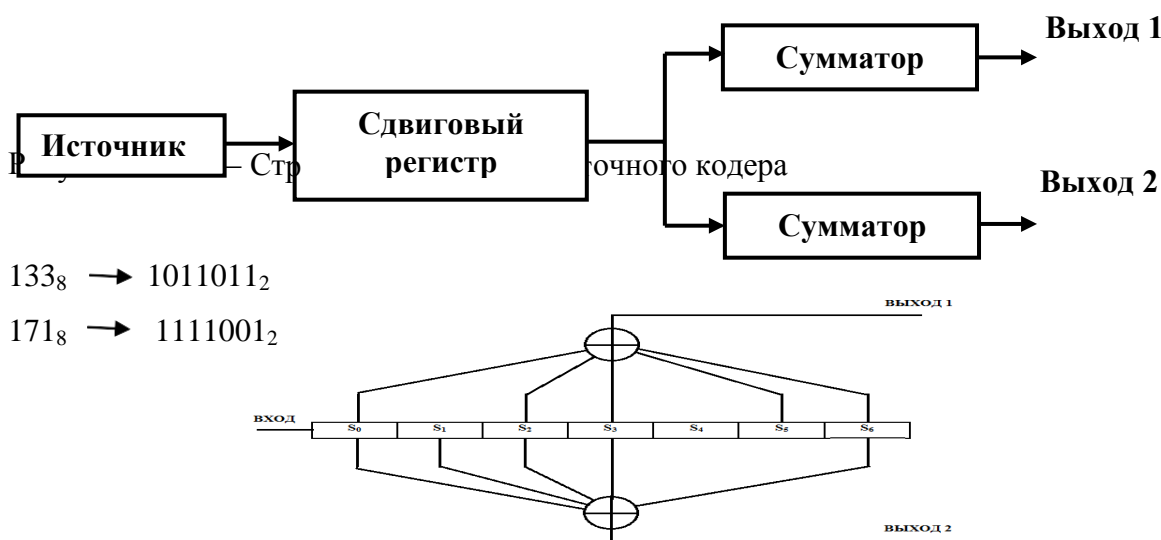


Рис. 10.7. Функциональная схема сверточного кодера 133,171

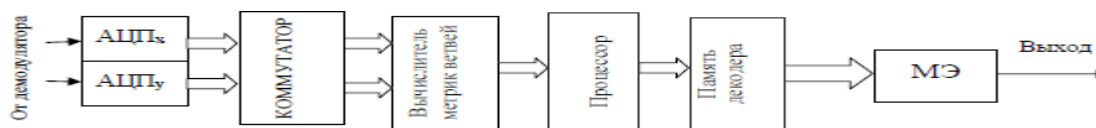


Рис. 10.8. Структурная схема декодера Витерби

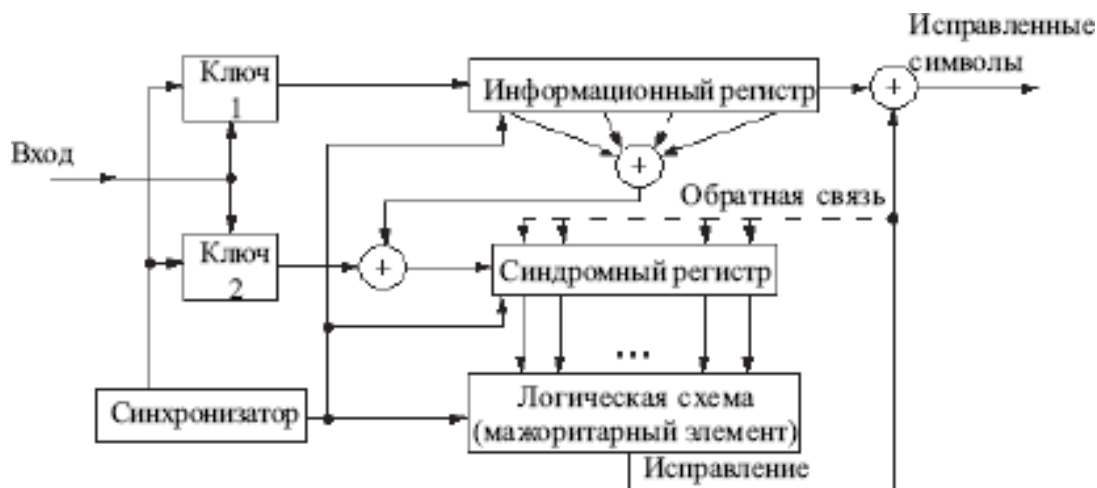


Рис. 10.9. Функциональная схема декодера Витерби

### Внутреннее перемежение

Как показано на слайде внутреннее перемежение 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. 10.10. Функция битового перемежения для QAM-64

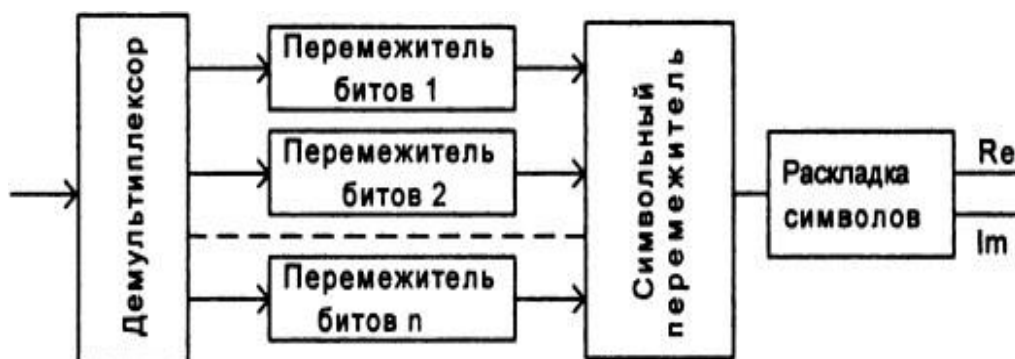


Рис. 10.10. Структурная схема внутреннего перемежителя системы DVB-T

## Модуляция в системе DVB-T

В системе цифрового наземного телевизионного вещания используются следующие виды модуляции: QPSK, QAM-16 и QAM-64. Диаграммы созвездий проиллюстрированы на рисунке 10.11.

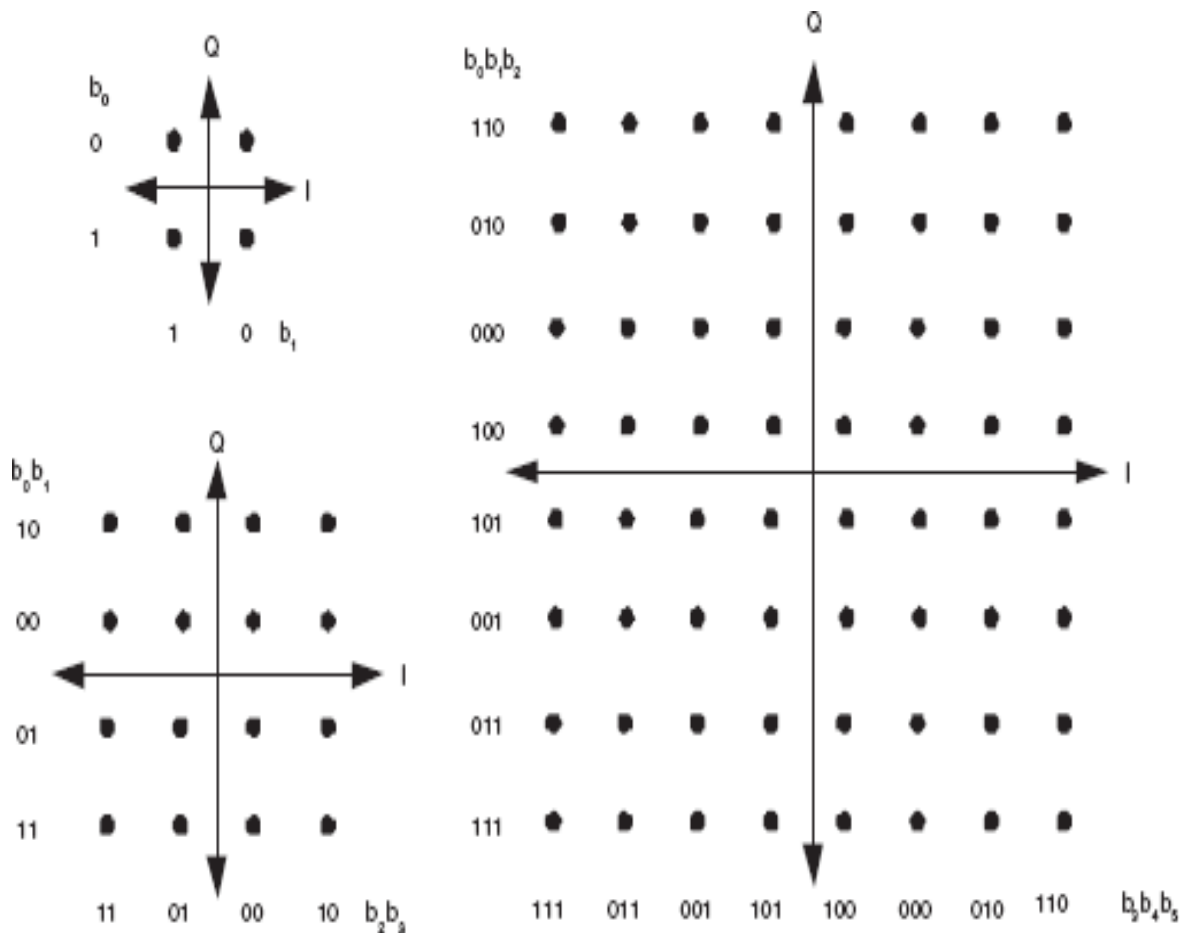


Рис. 10.11. Виды модуляции используемые в системе DVB-T

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.

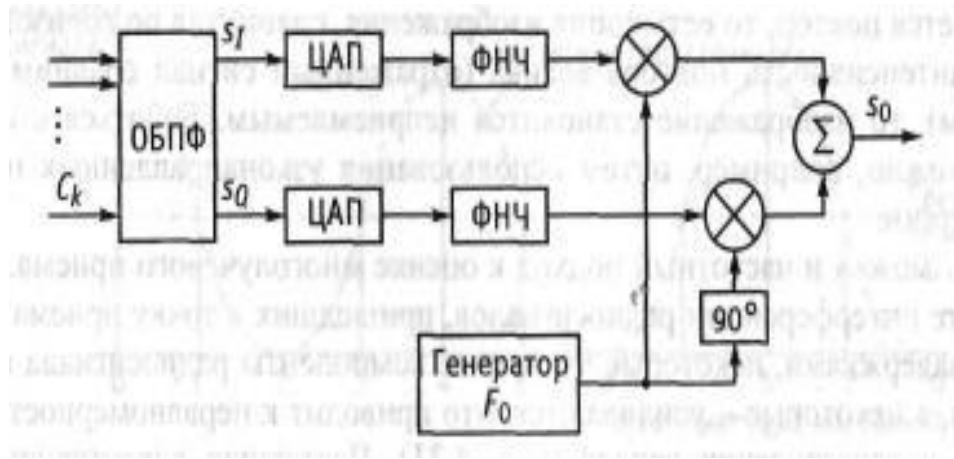


Рис. 10.12. Структурная схема формирователя OFDM-символа в системе DVB-T



Рис. 10.13. Структура OFDM-символа в системе DVB-T

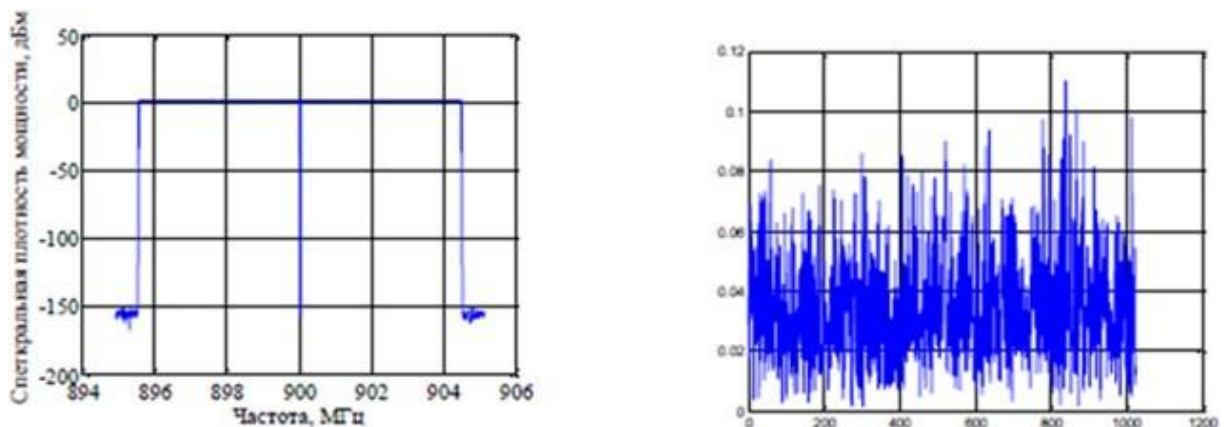


Рис. 10.14. Спектральное и временное представление OFDM-сигнала



## Практическая часть

В первую очередь была запущена модель системы DVB-T в программе Matlab следующим образом: Matlab R2015b – Simulink Library Browser – Open – dvbt.slx.

### – Simulink

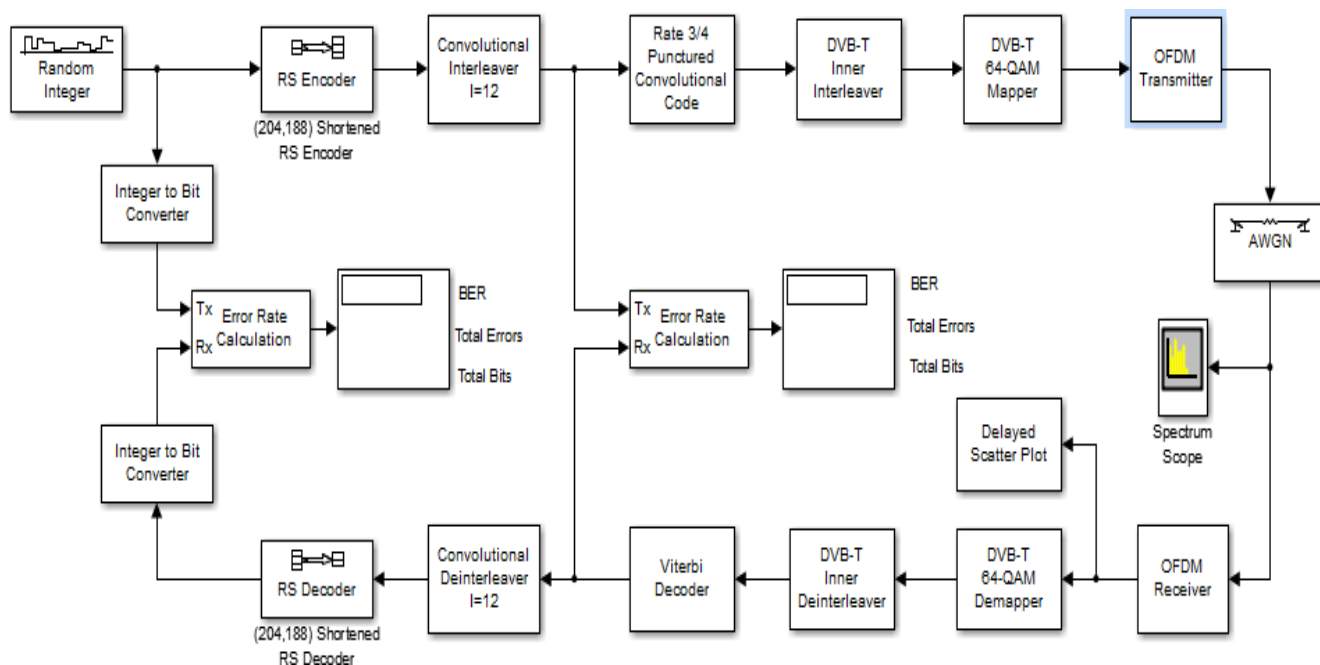


Рис. 10.15. Функциональная схема системы DVB-T реализованная в Matlab R2015b

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 10.1.

Таблица 10.1 – Зависимость BER от SNR для системы DVB-T

<i>SNR</i> , дБ	1	5	9	13	17	21	25
<i>BER</i>	0.5	0.49	0.47	0.29	0.001	$5 \times 10^{-6}$	0

На основании данных представленных в таблице 10.1 был построен график зависимости битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум.

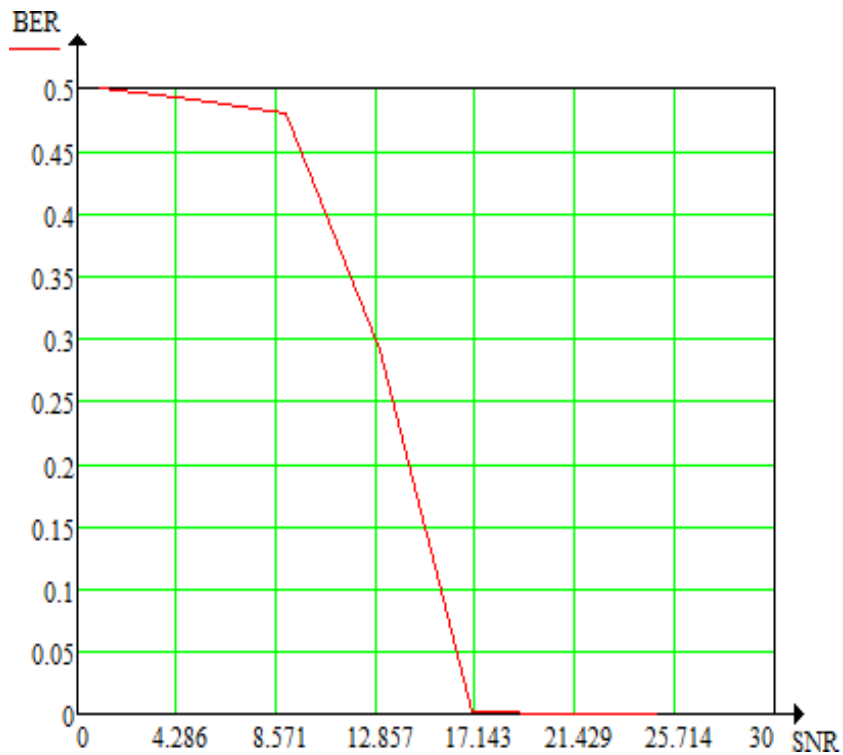


Рисунок 10.16. Зависимость BER от SNR для системы DVB-T при использовании 64-QAM

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.

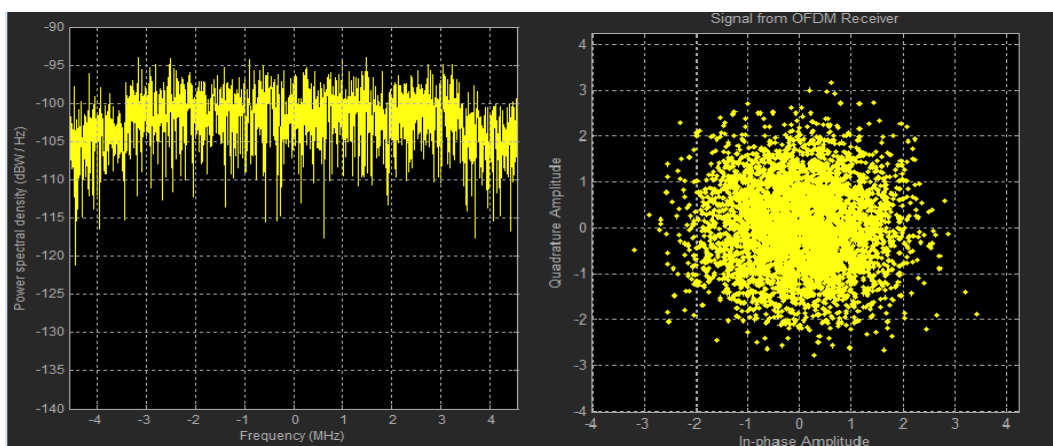


Рис. 10.117. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 64-QAM при SNR=1 дБ

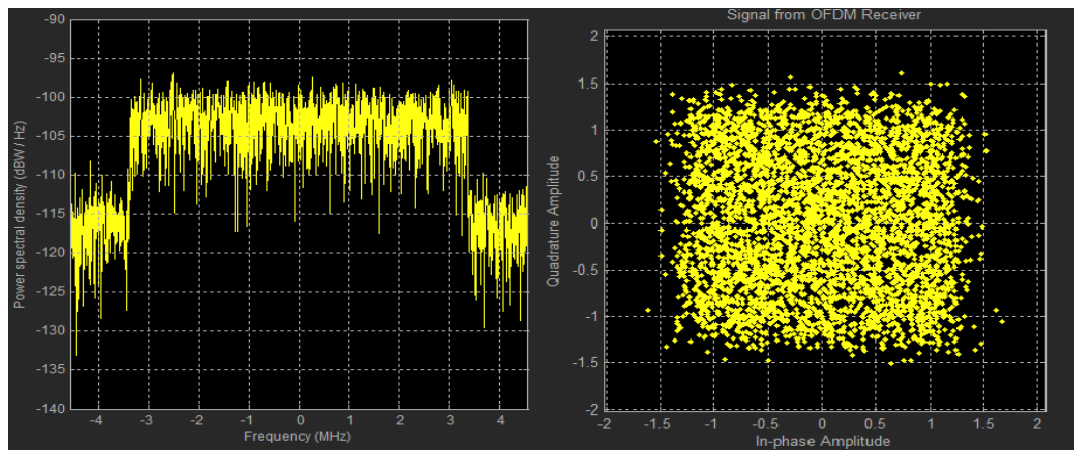


Рис. 10.18. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 64-QAM при SNR=13 дБ

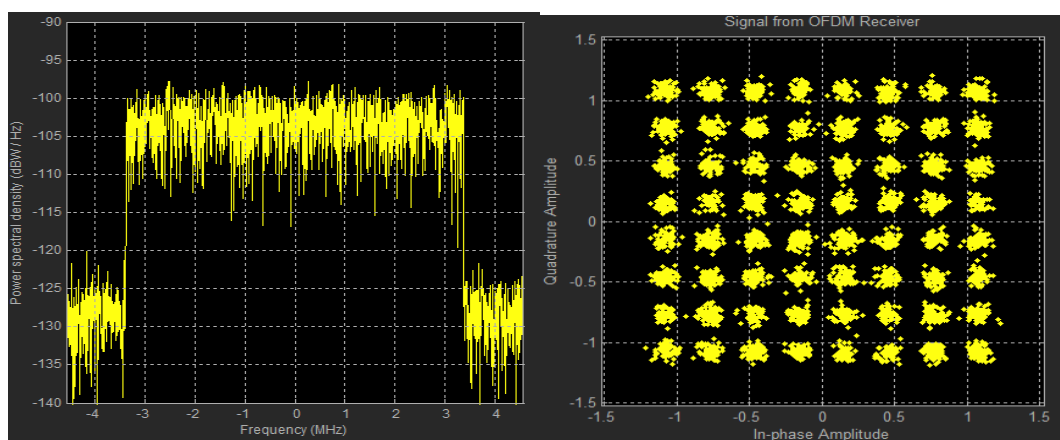


Рис. 10.19. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 64-QAM при SNR=25 дБ

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 5.155). 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.

**Генератор сигналов DVB-T2.** Поток данных, используемый в генераторе сигналов DVB-T2, генерируется случайным процессом, характеристики которого соответствуют

структуре ТВ данных.

Схема аппаратно-программного комплекса в среде разработки Simulink для стандарта DVB-T2.

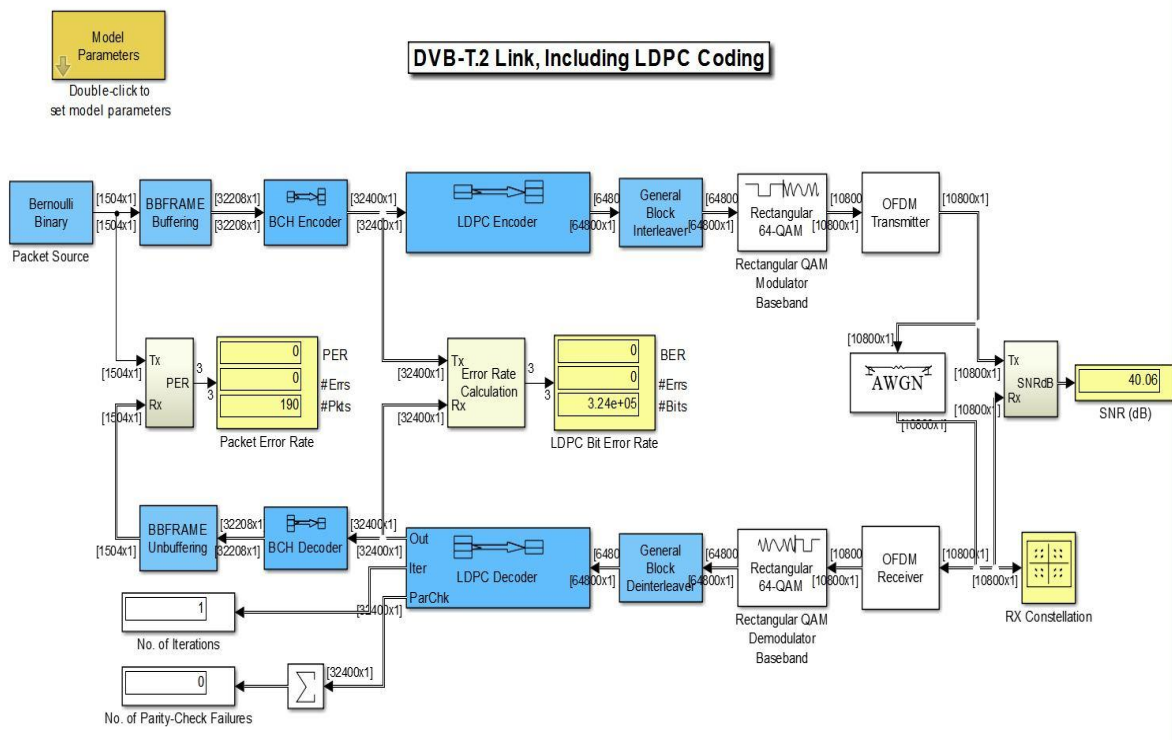
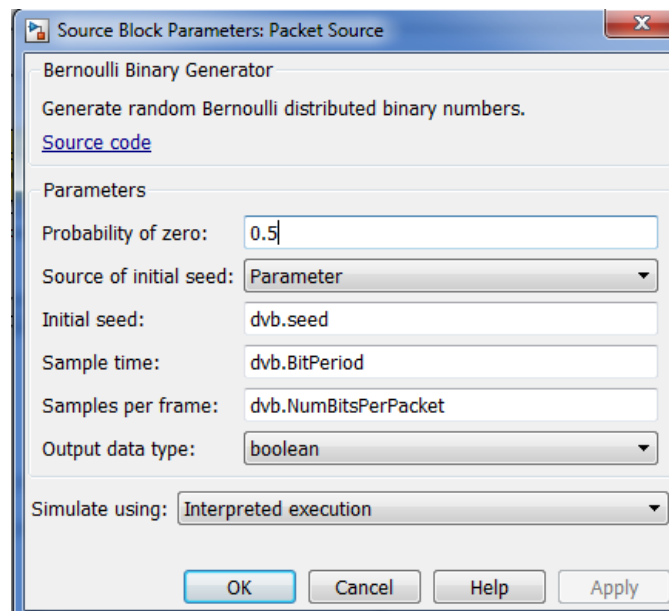


Схема аппаратно-программного комплекса DVB-S2

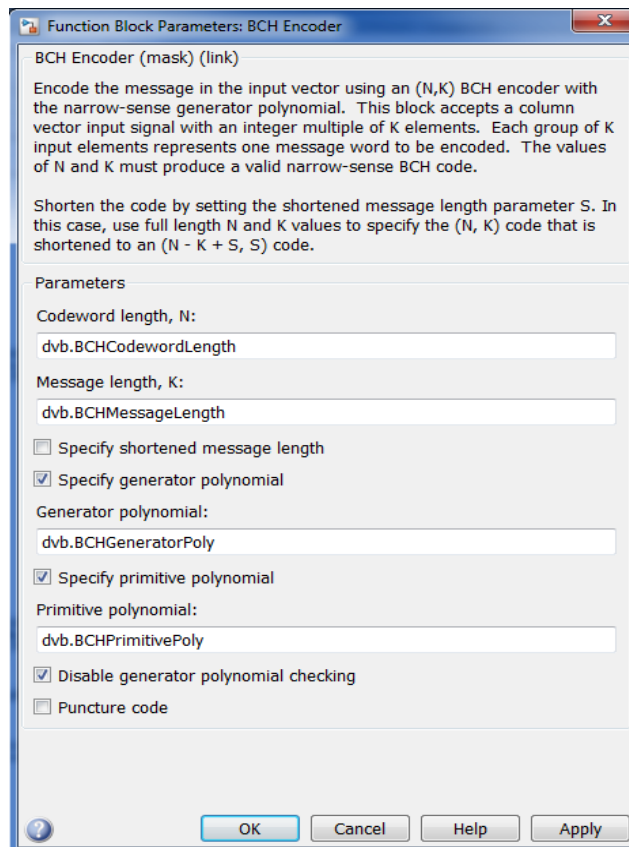
Схема включает в себя следующие функциональные блоки:

- 1) Bernoulli Binary Generator – Генератор псевдослучайной последовательности, имитирующей входной сигнал.



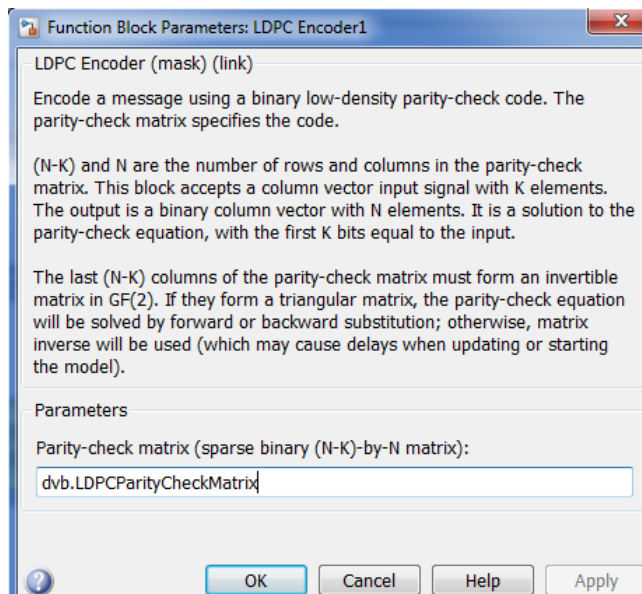
Окно блока Bernoulli Binary Generator

Кодер (декодер) BCH – осуществляет помехоустойчивое кодирование



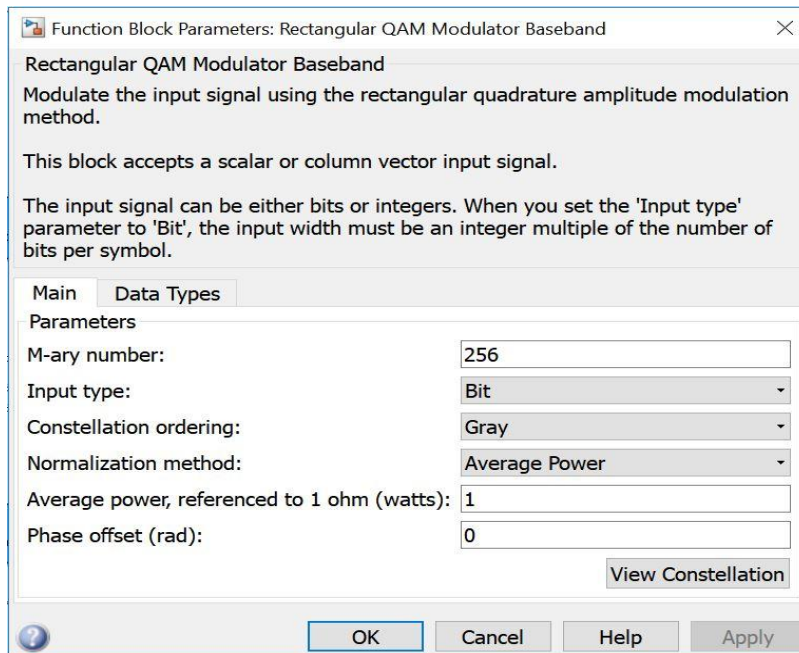
Окно блока BCH coder/decoder

LDPC coder (decoder) – кодирование, простая проверка на четность.



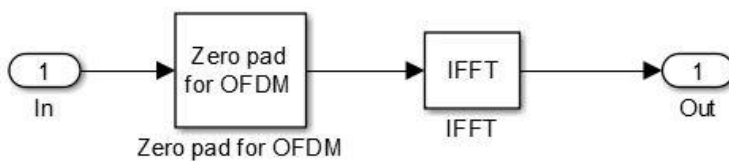
Окно блока LDPC coder

QAM – модулятор (демодулятор) кодовой последовательности.



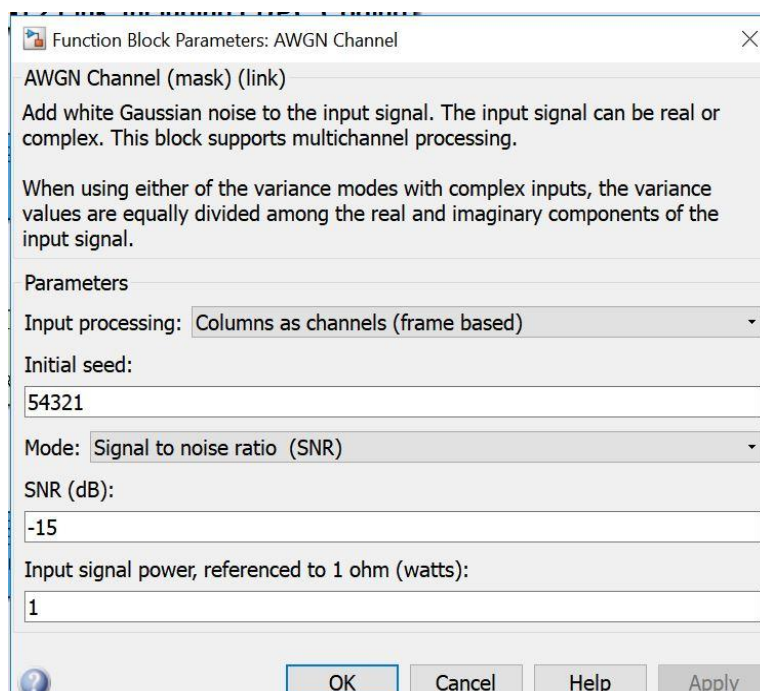
Окно блока QAM

## OFDM



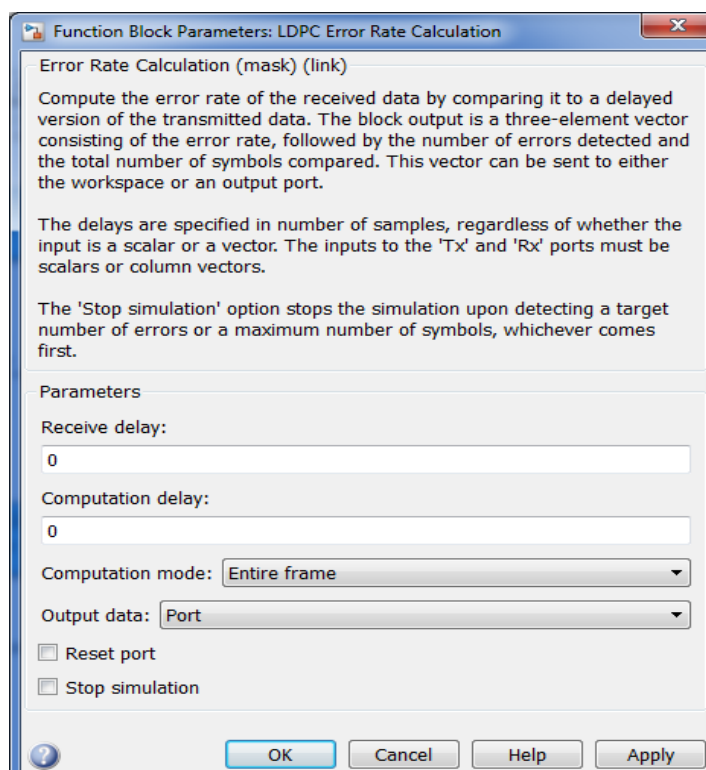
Окно блока OFDM

## WGN – Линия передачи



## Окно блока AWG

Error Rate Calculation – Разностное устройство для оценки количества и частоты ошибок между передающимся и принимаемым сигналом.



Окно блока подсчета ошибок

В таблице представлены результаты работы при использовании QAM-64 и QAM-256.

Таблица – Результаты работы системы

SNR	QAM-64	QAM-256
-15	0,4759	0,4832
-13	0,4695	0,4779
-11	0,4617	0,4714
-9	0,4525	0,4603
-7	0,4442	0,452
-5	0,4255	0,4363
-3	0,4036	0,4238
-1	0,3743	0,4053
1	0,3414	0,3755
3	0,3031	0,3481
5	0,261	0,3187

7	0,2169	0,2836
9	0,1713	0,2533
11	0,131	0,214
13	0,09759	0,175
15	0,06432	0,1398
17	0,0367	0,1065
19	0,01457	0,07926
21	0,003951	0,05198
23	0,000617	0,02799
25	0	0,01182
27	0	0,003272
29	0	0,00037
31	0	0
33	0	0

Построим зависимость BER от отношения сигнал/шум для обоих случаев. График представлен на рисунке.

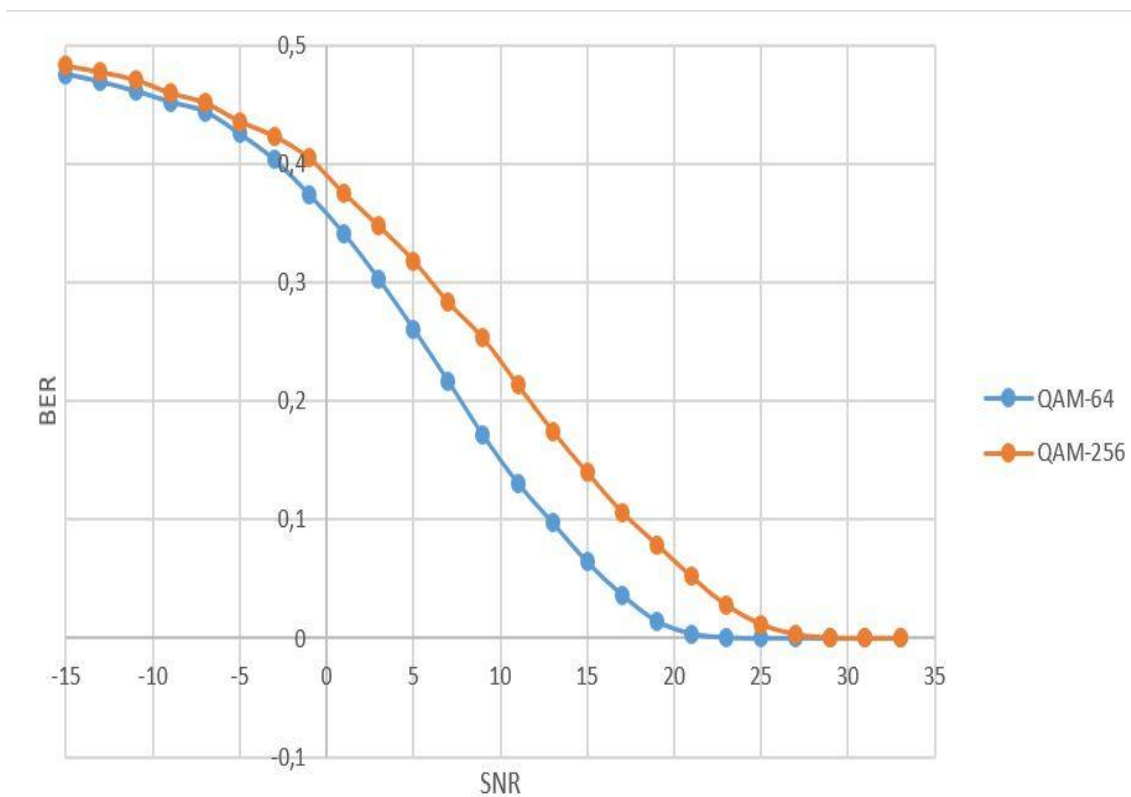
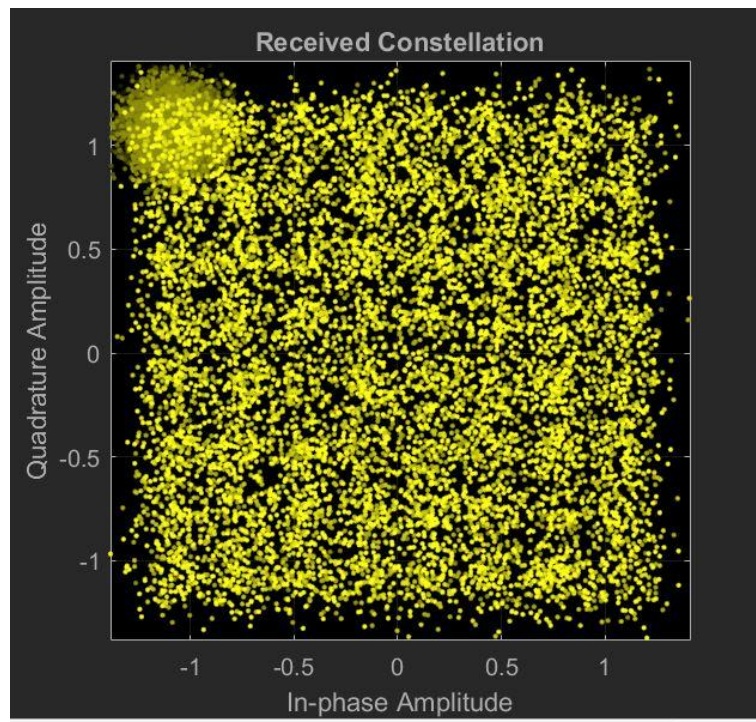


График зависимости BER от SNR

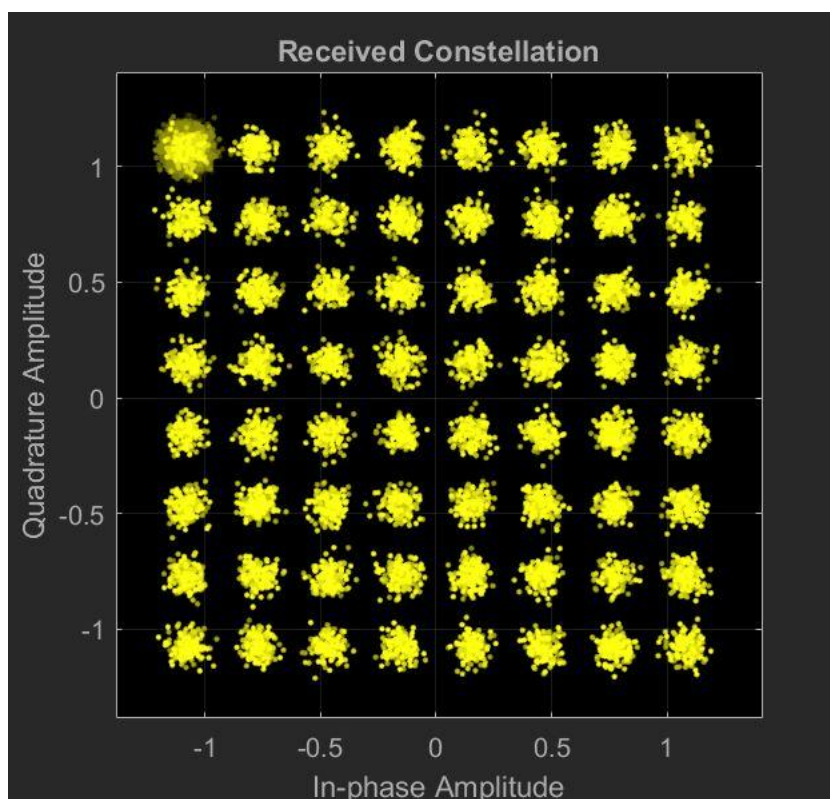
На рисунках представлены модулированные созвездия при QAM-64 на различных



значениях SNR (отношения сигнал шум).



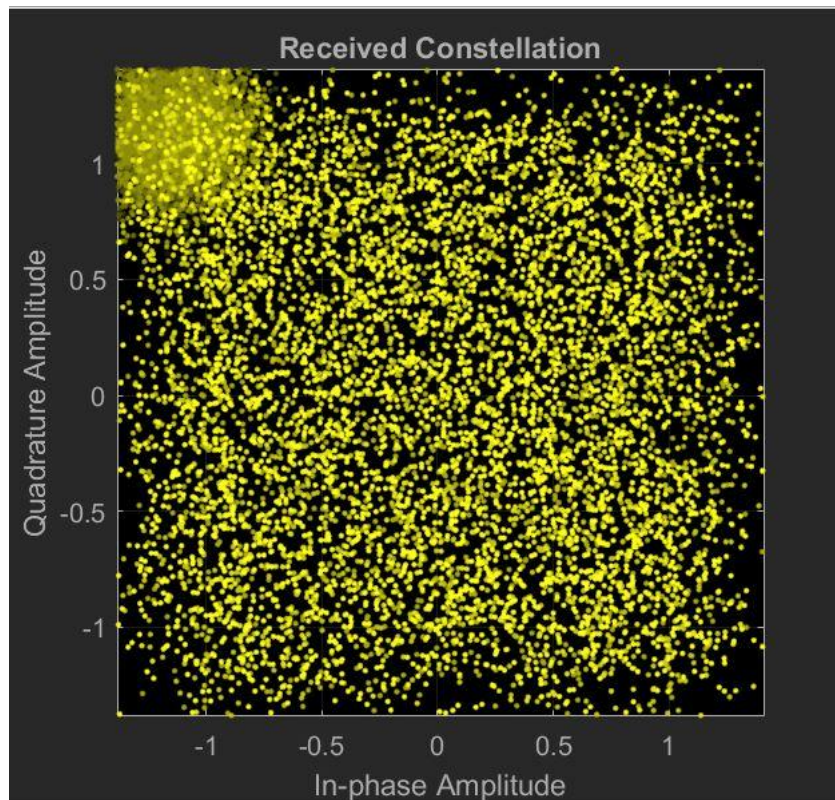
Модулированные созвездия QAM-64 при SNR = 17 дБ



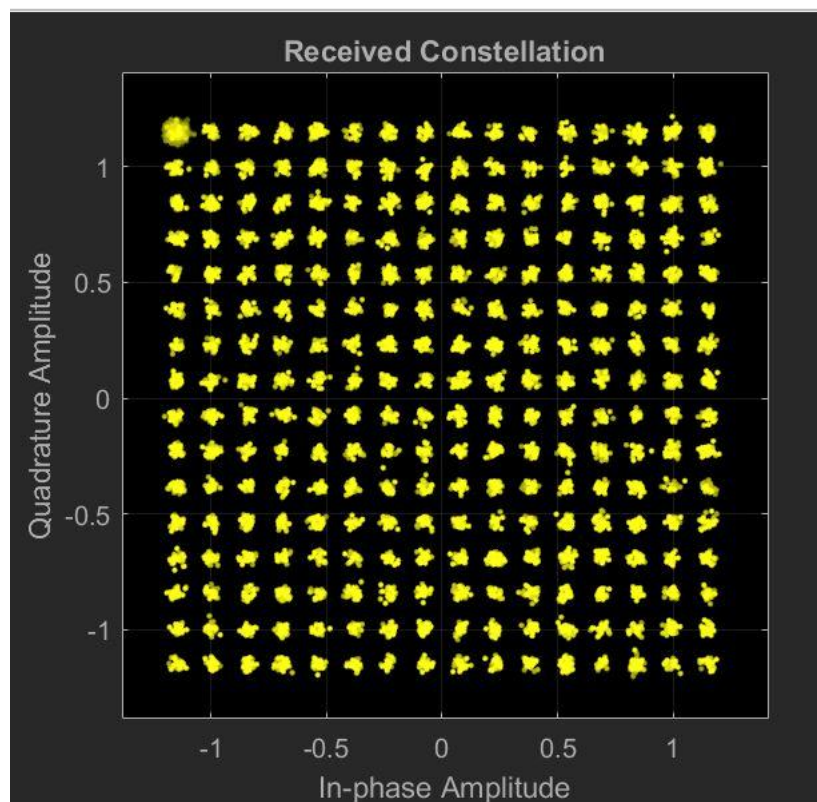
Модулированные созвездия QAM-64 при SNR = 25 дБ

На рисунках представлены модулированные созвездия при QAM-256 на различных

значениях SNR (отношения сигнал шум) .



Модулированные созвездия QAM-256 при SNR = 13 дБ



Модулированные созвездия QAM-256 при SNR = 33 дБ

В ходе проделанной работы было рассмотрено, что такое ПАРЛС. Разработана полуактивная радиолокационная система с использованием сигналов DVB-T2. Разработан аппаратно-программный комплекс для рассмотрения данной схемы передачи.

Так же при снятии зависимостей и характеристик были сделаны следующие выводы:

1) При изменении модулятора характер поведения зависимости BER от отношения сигнал шум влияет на работу стандарта DVB-T2. Таким образом, для QAM-64 необходимо отношение сигнал/шум более низкое для обеспечения той же BER как и в QAM-256;

2) При рассмотрении графиков созвездия можно наглядно видеть, как при увеличении отношения сигнал/шум после модулятора уменьшается ошибка, и значения становятся более группированными в значениях созвездия.

Порядок проведения лабораторной работы со стандартом DVB-T2»

1) Запустить систему DVB-T2 в программе Matlab следующим образом:

**commdvbt2.slx**

2) Снять зависимость битовой вероятности ошибки (BER) от отношения сигнал/шум (SNR), путем изменения параметра SNR в блоке AWGN в диапазоне от -15 дБ до 30 дБ с шагом 2-4 дБ;

2.1 Внести результаты измерений в таблицу:

2.2 Представить изображения спектра передаваемого сигнала и диаграммы созвездий 64-QAM исследуемой системы при SNR равном 1 дБ, 9 дБ и 25 дБ.

3) Построить график зависимости BER от SNR на основе результатов представленных в «Таблице X»

4) Сделать выводы по проделанной работе.

5) Оформить отчет в соответствии с требованиями ОС ТУСУР 2013.

## 11. СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ DVB-S И СИСТЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЦИФРОВОГО СПУТНИКОВОГО ТВ-ВЕЩАНИЯ DVB-S2

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-надом» (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 11. 1. 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		
	5/6	12,456553		
16-QAM	1/2	15,037432	60	101
	3/5	18,07038		
	2/3	20,107323		
	3/4	22,619802		
	4/5	24,136276		
	5/6	25,162236		
64-QAM	1/2	22,481705	60	151
	3/5	27,016112		
	2/3	30,061443		
	3/4	33,817724		
	4/5	36,084927		
	5/6	37,618789		
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 свер- точного кода и сокращенного кода Рида-Соломона. Система может быть использована в спутниковых ретрансляторах с различной шириной полосы.

На рис. 5.189 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 демультиплексора MPEG-2.

При адаптации сигнала к спутниковому каналу связи осуществляются следующие операции:

- адаптация транспортного мультиплексирования 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.

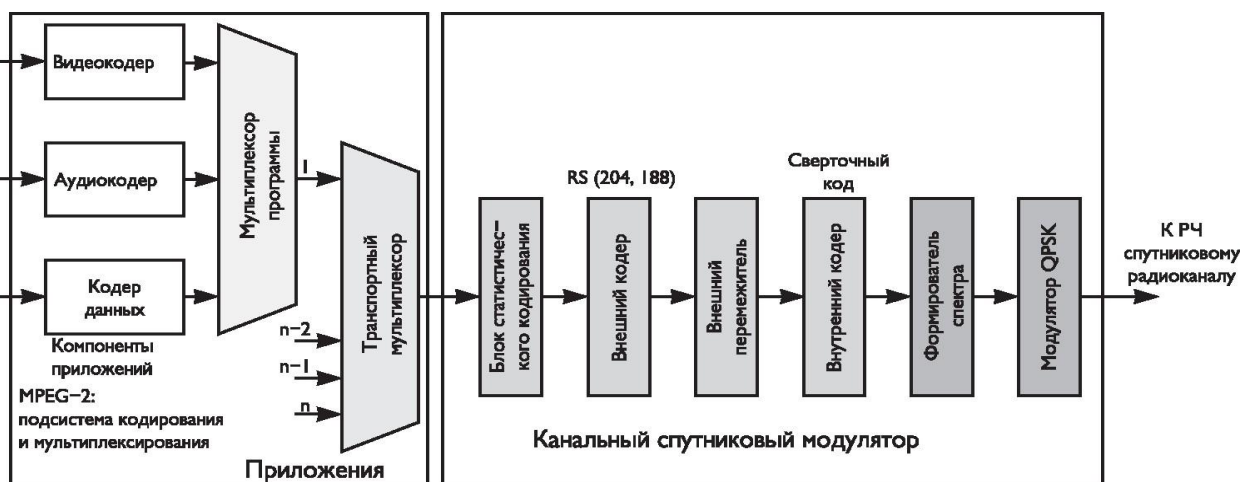


Рис. 11.1. Структурная схема передающей части системы DVB-S

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 11.2).

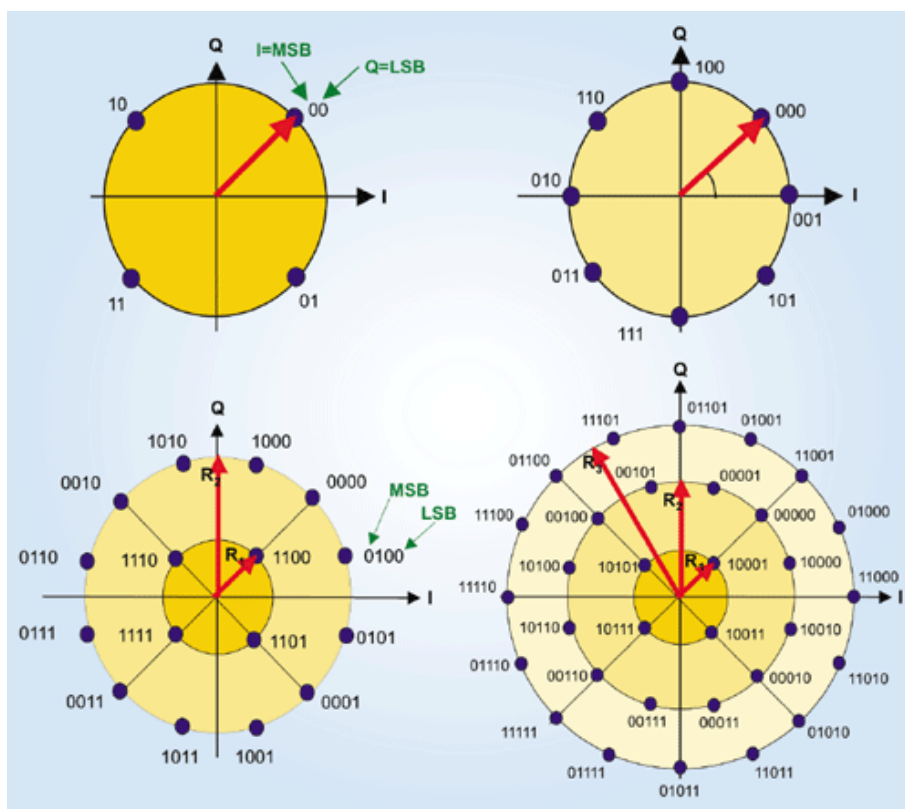


Рис. 11.2. Четыре схемы модуляции, применяемых в стандарте DVB-S2:  
QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK

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 предвыскажений, а на приемной стороне должен быть обеспечен более высокий уровень отношения сигнал/шум.

### Практическая часть индивидуального задания

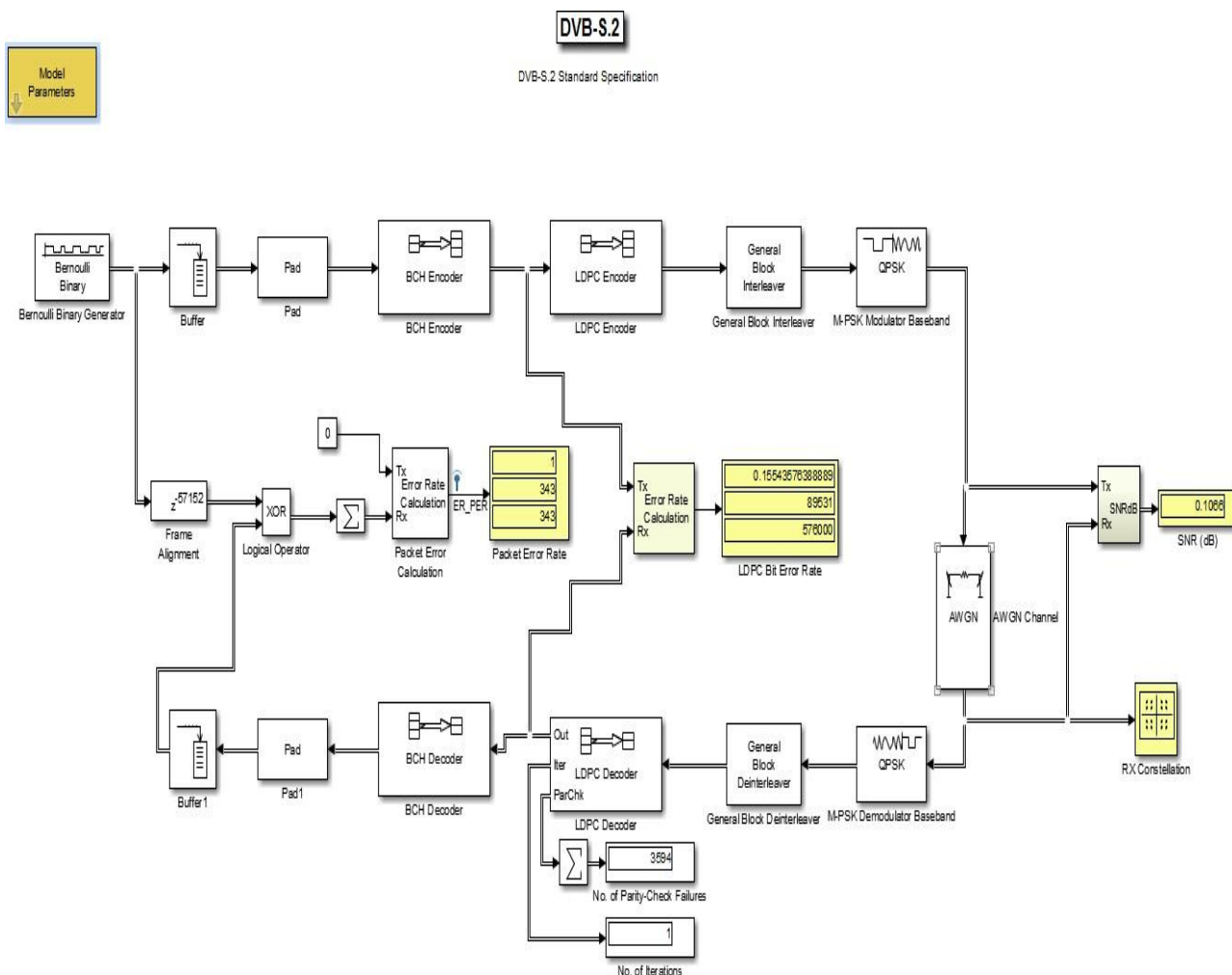


Рис. 11.3. Структура DVB-S2 в Simulink MATLAB 2015b

Структура модема и кодера 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 0 и 1. Выходной сигнал этого кадра основного же размера как пакет 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 BCH был равен размерам входного сигнала, на входе кодера. Информационные биты (DFL) могут быть рассчитаны по формуле:

$$\text{DataField} = K_{\text{BCH}} - 80$$

Где  $K_{\text{BCH}}$  является размер внешнего кода FEC кодер BCH, и размер заголовка равен 80 BBFrame. Структура BBFRAME показана на рисунке 4.

3. BCH encoder/decoder - Одним из DVB-S2 достижений является прямое исправление ошибок, которые развернуты, чтобы уменьшить BER в передаче используется исправление ошибок BCH. Выход BBFrame буферизации блока на стороне отправителя, являются кадры бит, где BCH исправление ошибок с исправлением влечет за собой применение к ним. Для каждого из 11 скорости кодирования представлены в стандартных значений  $K_{\text{bch}}$  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 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

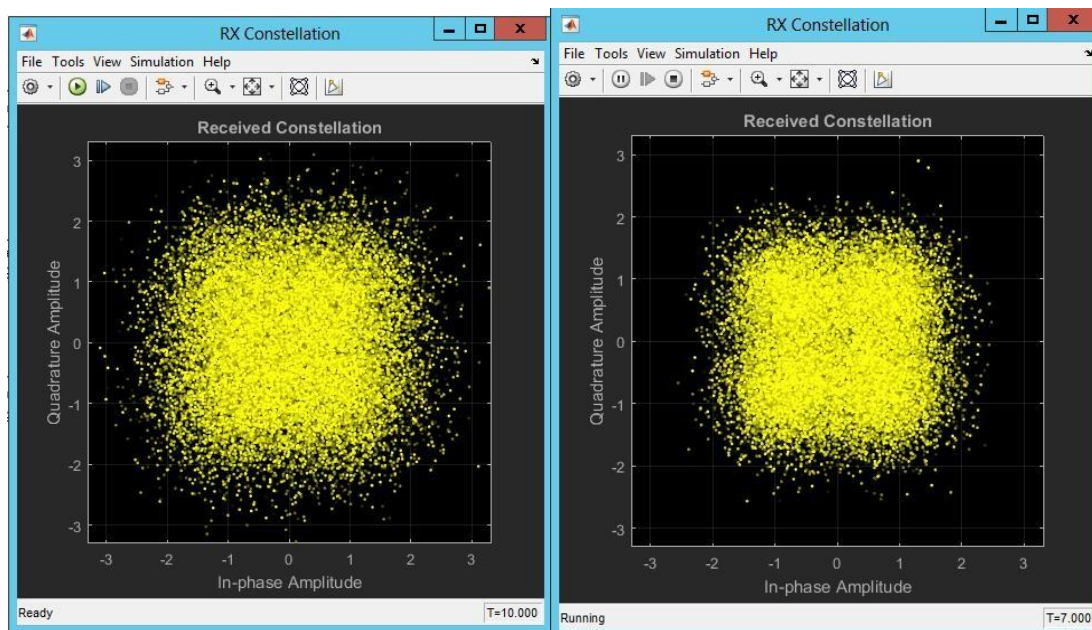


Рис. 11.4. Созвездие при  $E_b/N_0 = 0.5$  и  $E_b/N_0 = 3.5$

### Вид модуляции QPSK 3/4

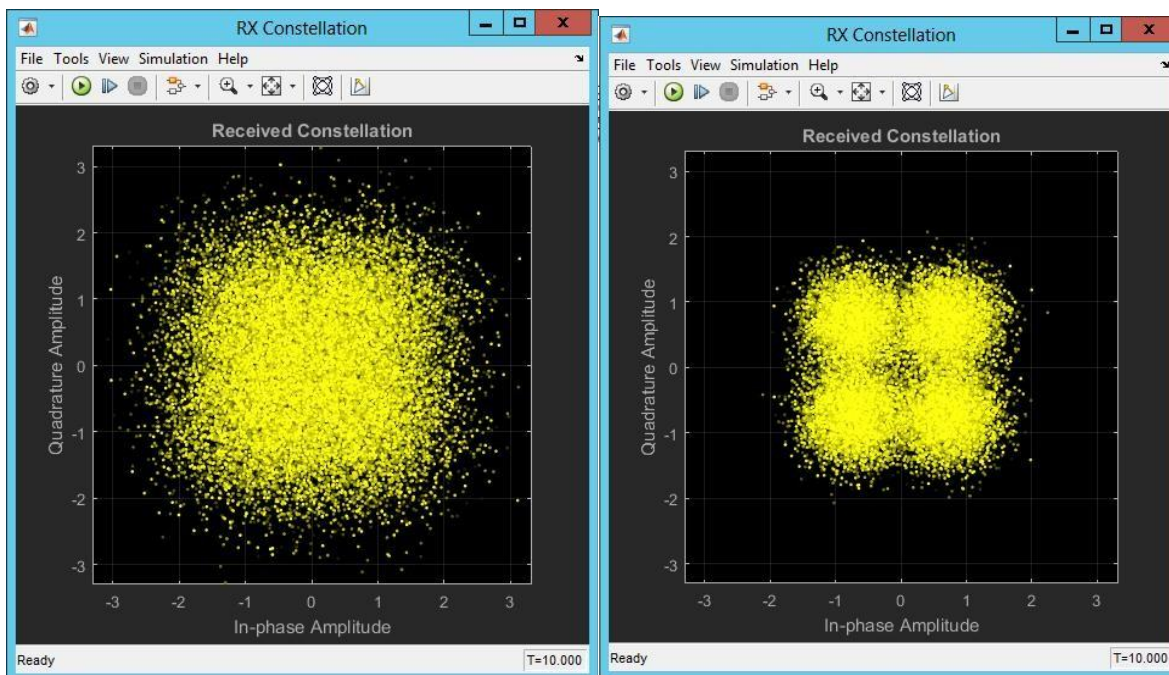


Рис. 11.5. Созвездие при  $E_b/N_0 = 0,5$  и  $E_b/N_0 = 5$

## Вид модуляции - 8PSK

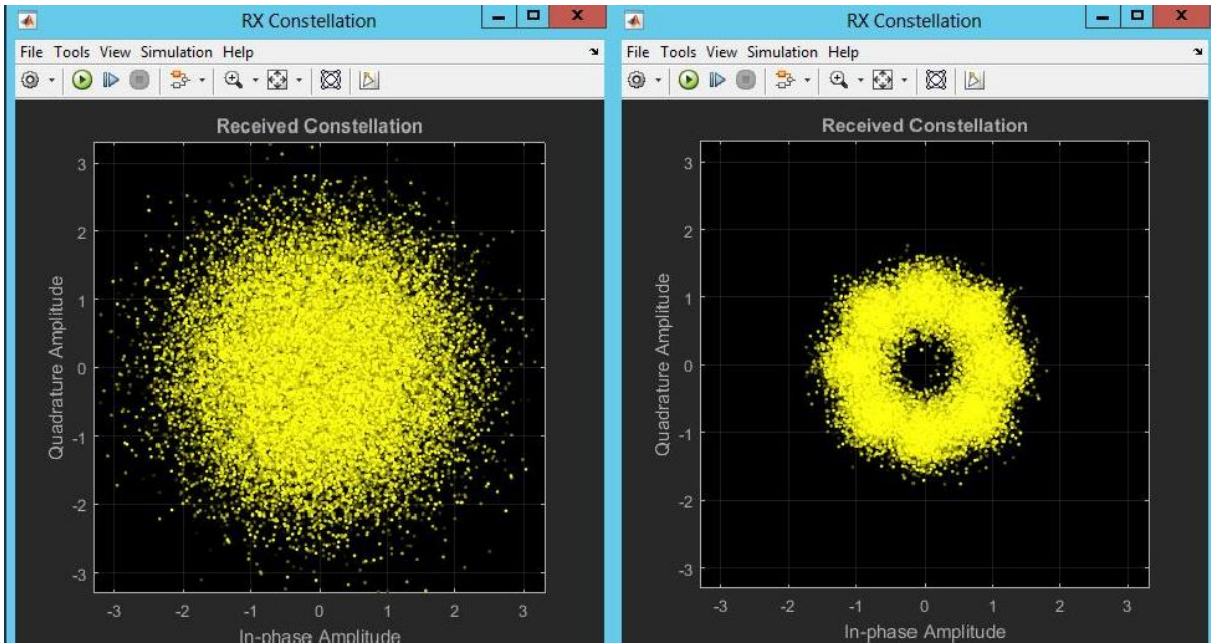


Рис. 11.6. Созвездие  $E_b/N_0 = 0,5$  и  $E_b/N_0 = 12$

## Вид модуляции - 8PSK9/10

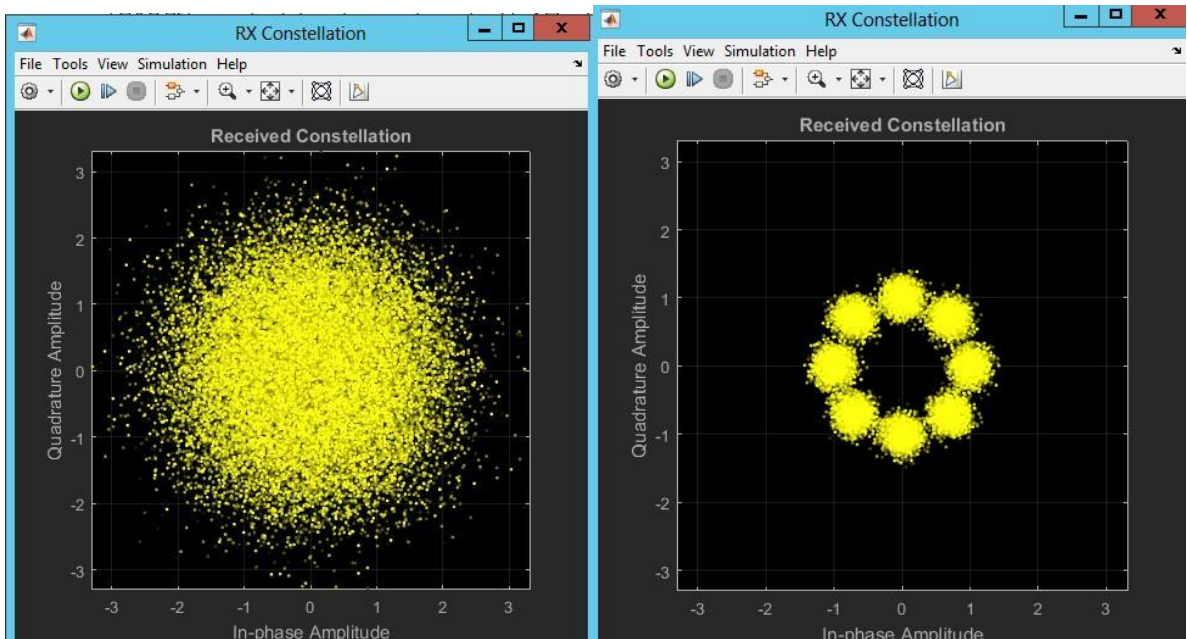


Рис. 11.7. Созвездие при  $E_b/N_0 = 0.5$  и  $E_b/N_0 = 6$

## График зависимости $E_b/N_0$ от BER

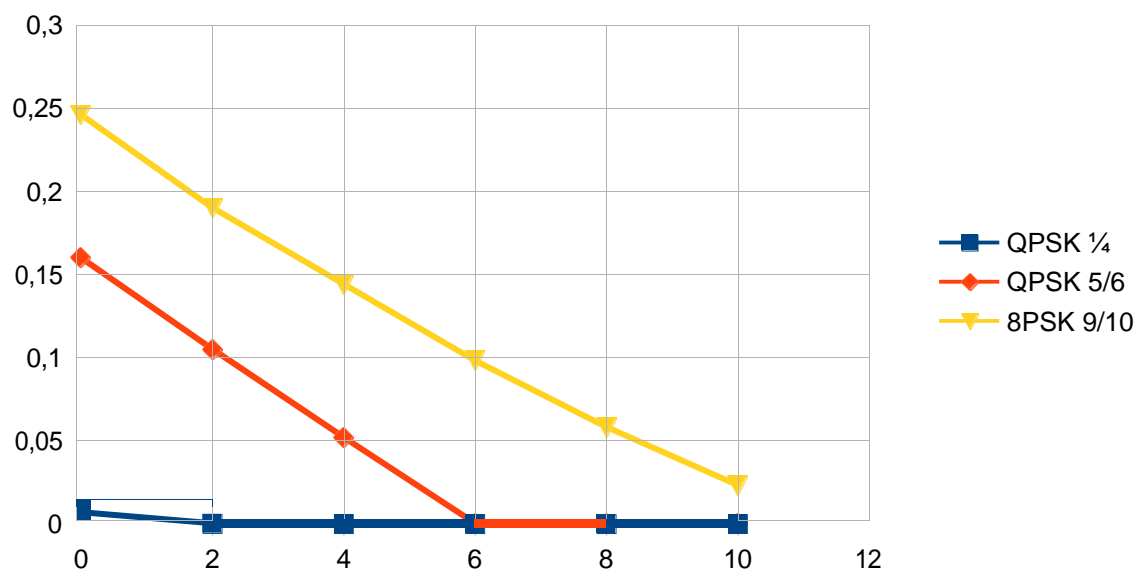


Рис.11.8. График зависимости BER от  $E_b/N_0$

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.

## 12. СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ DVB-C И СИСТЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЦИФРОВОГО КАБЕЛЬНОГО ТВ-ВЕЩАНИЯ DVB-C2

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.

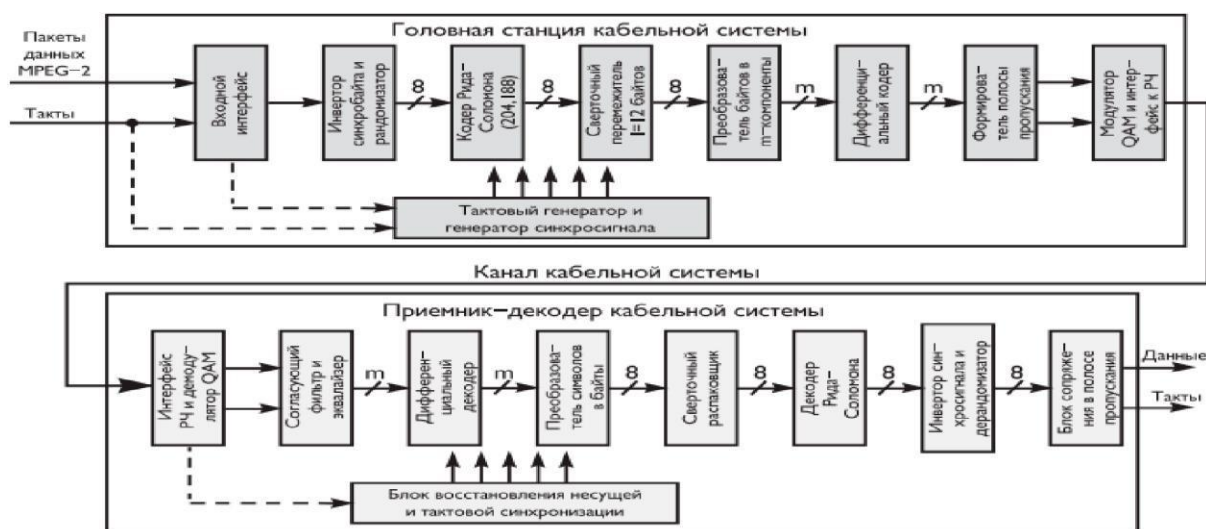


Рис. 12.1. Структурная схема системы цифрового кабельного телевидения DVB-C

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 Ридд-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. Притом 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:  $8k = n \cdot m$ , (1) где  $k$  и  $n$  — числа преобразуемых байтов и последовательности двоичных символов, соответственно (см. табл. 12.1.).

Таблица 12.1. 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. 12.2. приведен пример реализации преобразования байтов в символы.



Рис. 12.2. 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  $F_{\text{симв}} = 27,5$  Мсимв/с,  $R = 3/4$ .

Таблица 12.2. Примеры расчетных значений символьной и информационной скоростей при использовании стандарта DVB-S.

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.

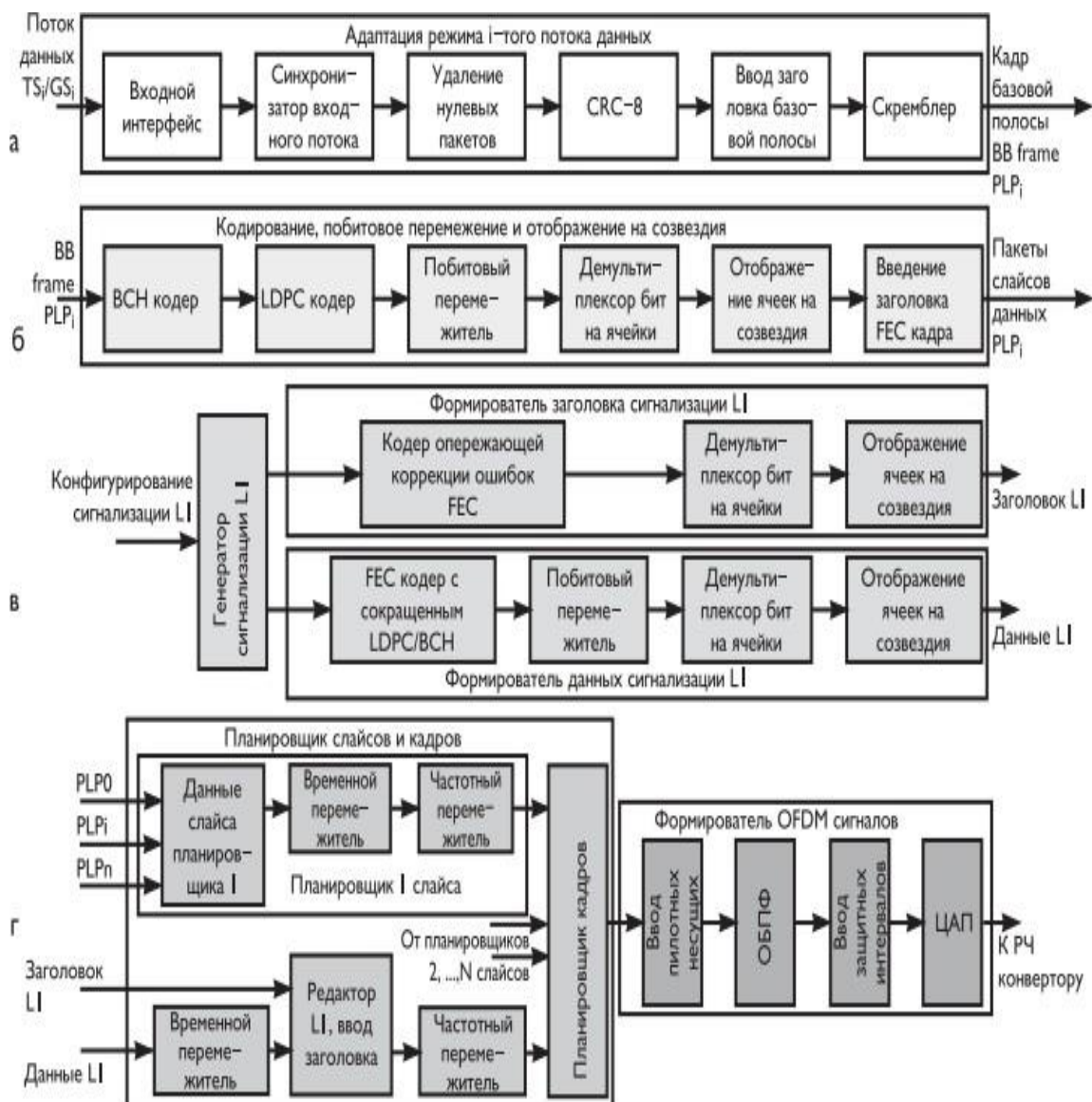


Рис. 12.3. Структурная схема передающей части системы DVB-C2

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:  $0 < DFL < (Kbch - 80)$ , где Kbch — 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 демультиплексора 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 VbFrame 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  $Q_{ldpc}$  определены в табл. 5.22.

Таблица 12.3. Значения  $Q_{ldpc}$  для основных и сокращенных кадров.

Скорость кода	$N_{ldpc} = 64\ 800$	$N_{ldpc} = 16\ 200$
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	–

Конфигурация перемежения со сдвигом начала столбцов для каждого формата модуляции определена в табл. 12.4.

Таблица 12.4. Структура побитового перемежителя

Модуляция	Строки $N_r$		Столбцы $N_c$
	$N_{ldpc} = 64\ 800$	$N_{ldpc} = 16\ 200$	
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. 12.5.

Таблица 12.5

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. 12.6.

Таблица 12.6. 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  $N_{\text{substreams}}$  подпотоков (табл. 12.7).

Таблица 12.7. Количество подпотоков в демультиплексоре.

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

Демультиплексирование определяется как отображение подвергнутых побитовому перемежению входных битов,  $v_{di}$ , на выходные биты  $b_{e,do}$  на выходе демультиплексора  $d_i \bmod N_{\text{substreams}}$  — число входных битов;  $d_o = d_i \div N_{\text{substreams}}$  — число битов в заданном потоке на выходе демультиплексора;  $e$  — количество демультиплексированных битовых потоков, ( $0 < e < N_{\text{substreams}}$ ), зависящее от  $d_i$ ).

Каждое модулирующее значение ячеек, поступающее от демультиплексора, 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  $[u_{0,q} \dots u_{q-1,q}] \bmod -1,q$  нормализуются в соответствии с табл. 12.7.

Таблица 12.8. Параметры демультиплексирования 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 ( $N_{\text{ldpc}} = 64\,800$ )																								
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 ( $N_{\text{ldpc}} = 16\,200$ )																								
Вход	0 1 2 3 4 5 6 7																							
Выход	7 3 1 5 2 6 4 0																							
1024-QAM ( $N_{\text{ldpc}} = 64\,800$ )																								
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 ( $N_{\text{ldpc}} = 16\,200$ )																								
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 ( $N_{\text{ldpc}} = 64\,800$ )																								
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 ( $N_{\text{ldpc}} = 64\,800$ )																								
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																							

Таблица 12.9. 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	$f_q = z_q / \sqrt{2730}$

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/BCH – кодированию с последующим побитовым перемежением, демультимплексированием и 16-QAM модуляцией. На рис. 12.4 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  $nKDC_{max} - KDC_{min} 3408$  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. 12.5а.

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:

$$\operatorname{Re} \{ c_{m,LP,k}^P \} = A_{PP} \cdot 2(1/2 - r_k), \quad \operatorname{Im} \{ c_{m,LP,k}^P \} = 0,$$

где  $AP \cdot P = 1$ ,  $m$  — номер кадра,  $IP$  — номер символа преамбулы,  $k$  — индекс несущей, а  $rk$  определено только для значений  $k$ , кратных 6, и вычисляется по формуле:

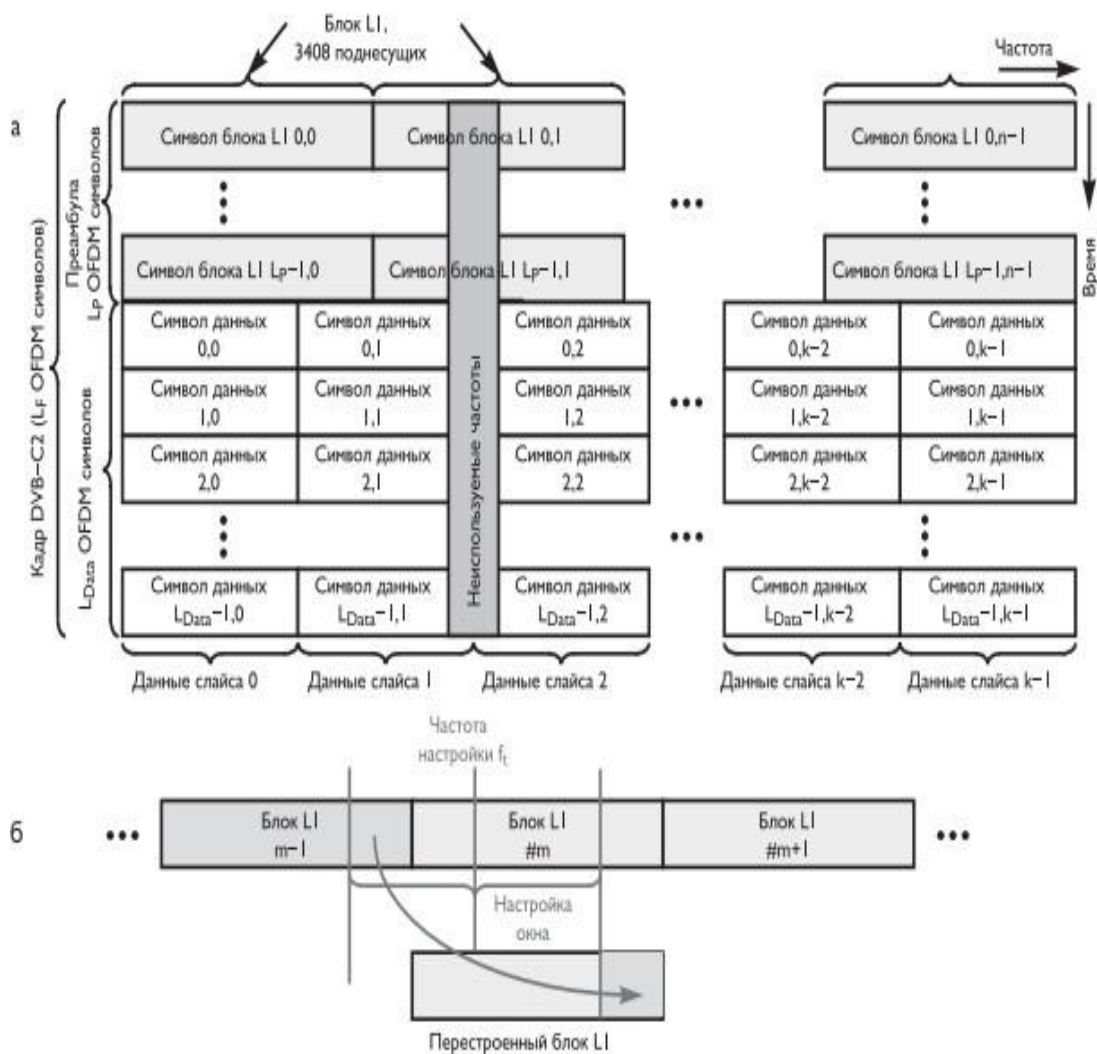


Рис. 12.5. Структура кадра системы DVB-C2.

$$r_k = \begin{cases} w_k^P, & k \bmod K_{L1} = 0; \\ r_{k-6} \oplus w_k^P, & \text{иначе;} \end{cases} \quad w_k^P = w_k \oplus w'_i, i = (k \bmod K_{L1})/D_P;$$

$w_i$  — PRBS регистра сдвига, определяемого соотношением  $x^2 + x + 1$ , 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  $x^2 + x + 1$ , иницируемого последовательностью единиц, т. е.  $w_0, w_1, w_2, \dots = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, \dots$ . 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,  $D_X, D_Y$ .

Таблица 12.10. Коэффициенты, определяющие положение рассеянных пилотных несущих

Коэффициент защитного интервала	Выделение пилотных несущих ( $D_X$ )	Номер символов формирования рассеянных несущих ( $D_Y$ )
1/64	12	4
1/128	24	4

Кроме рассеянных пилотных несущих в каждый символ кадра, за исключением преамбулы, вводятся постоянные несущие. Индексы этих несущих локально в пределах блока из  $KL1 = 3408$  приведены в табл. 12.11.

Таблица 12.11. 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:

$$s(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{\sqrt{K_{\text{total}}}} \sum_{l=0}^{L_F-1} \sum_{k=K_{\min}}^{K_{\max}} c_{m,l,k} \cdot \psi_{m,l,k}(t) \right] \right\},$$

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;  $K_{\text{total}}$  — количество используемых несущих,  $K_{\text{total}} - K_{\min}$  —  $K_{\max}$ ;  $L_F$  — 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;  $T_{FLFTS}$  — 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.

Таблица 12.12. 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

Таблица 12.13. 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.



Таблица 12.14. 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 [8.40]. Приемник со стандартной полосой пропускания извлекает из широкого пакета только необходимую часть спектра, не превышающую, например, 8 МГц.

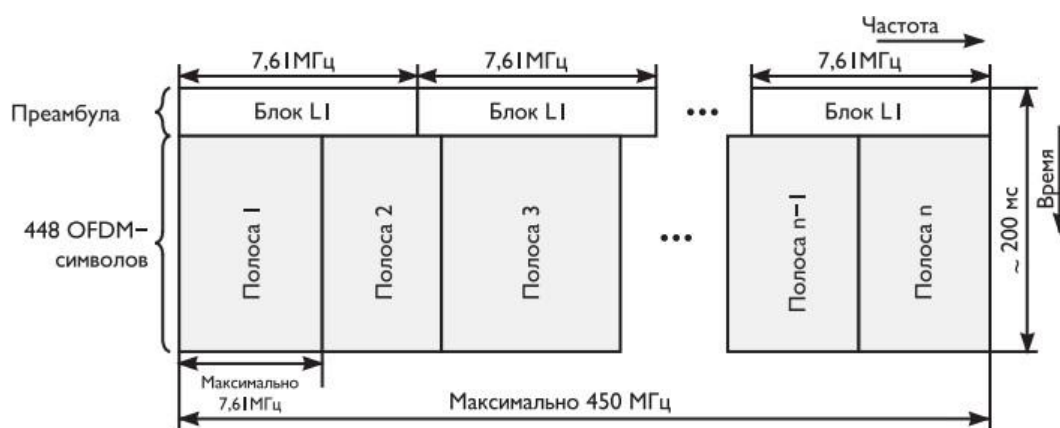


Рис. 12.6. Структура кадра DVB-C2 в частотно-временной области.

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

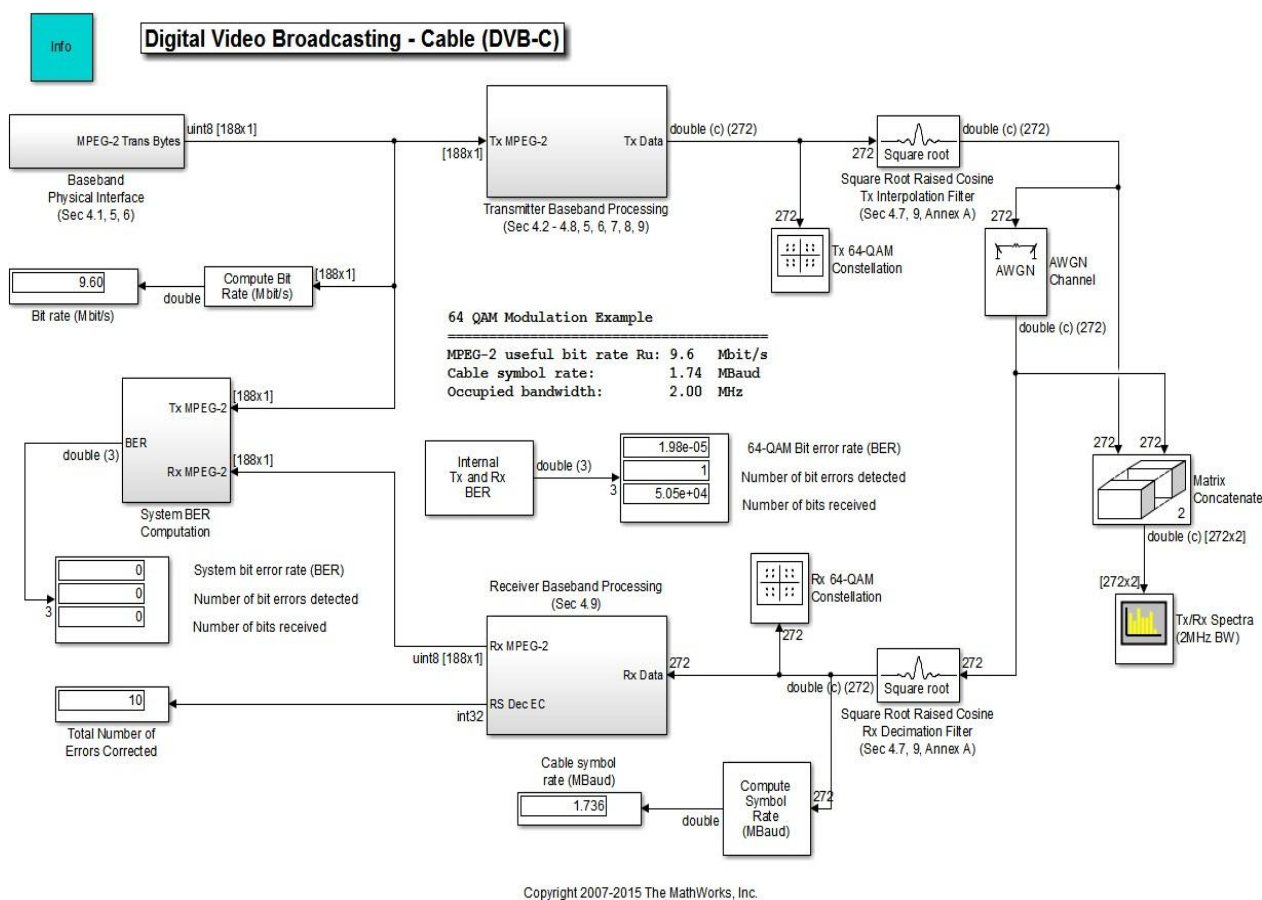


Рис. 12.7. Структурная схема системы цифрового кабельного телевидения DVB-C в Simulink MATLAB 2015

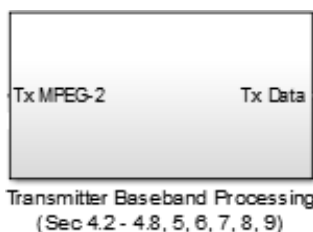


Рис. 12.8 Блок имитация потока данных MPEG- 2.

Внутри данного блока производится имитация потока данных MPEG- 2.

Представленный на рис. блок включает в себя:

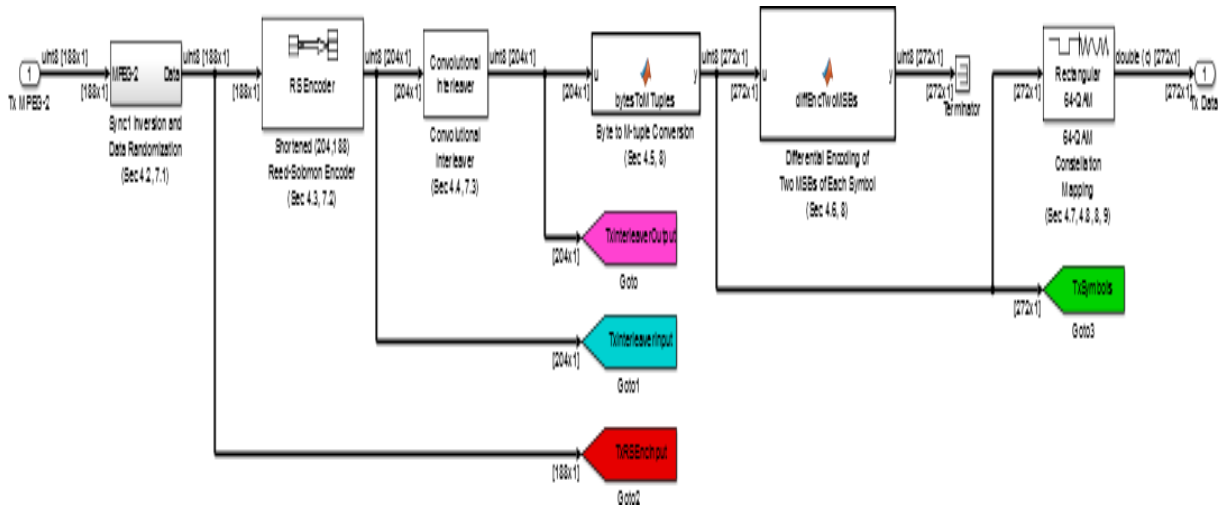


Рис. 12.8. Блок передатчика.

### 5. Sync1 Inversion and Randomization

Эта подсистема инвертирует байт, далее производится рандомизация с целью формирования спектра.

### 6. Кодировщик Рида-Соломона (204, 188).

Добавляет 16 паритетных байтов к MPEG-2.

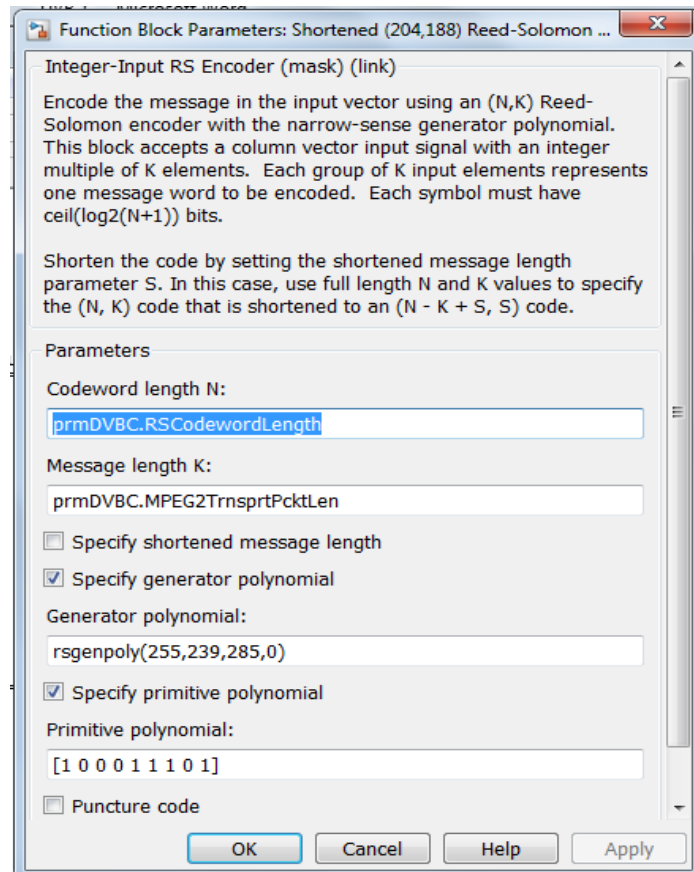


Рис. 12.9. Кодировщик Рида-Соломона (204, 188)

**7. Сверточный перемежитель.**

Процесс перемежения основан на подходе Форни.

**8. Байт (8 бит) с M- кортежами ( 6 -разрядная версия)**

Используется, чтобы преобразовать 8-битные байты данных в 6-битные.

**9. Дифференциальное кодирование.**

**10. Отображение 64-QAM созвездия.**

Отображает в основной полосе частот значения ( I и Q ) при передаче.

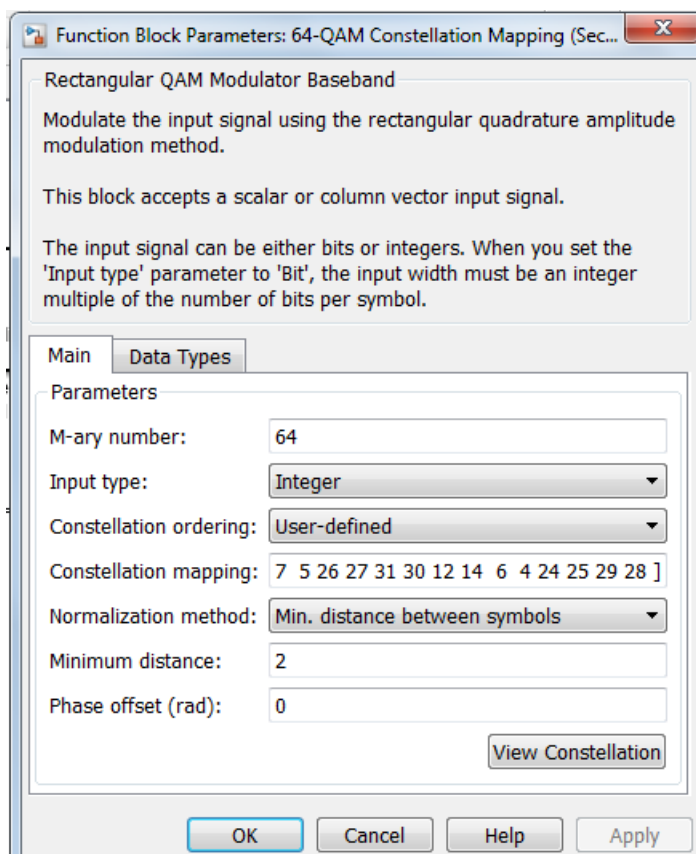
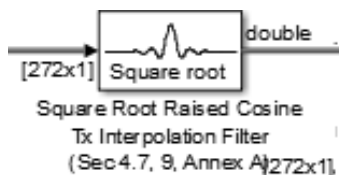
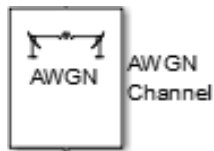


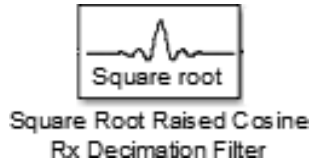
Рис. 12.10 - Отображение 64-QAM созвездия.



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 ).

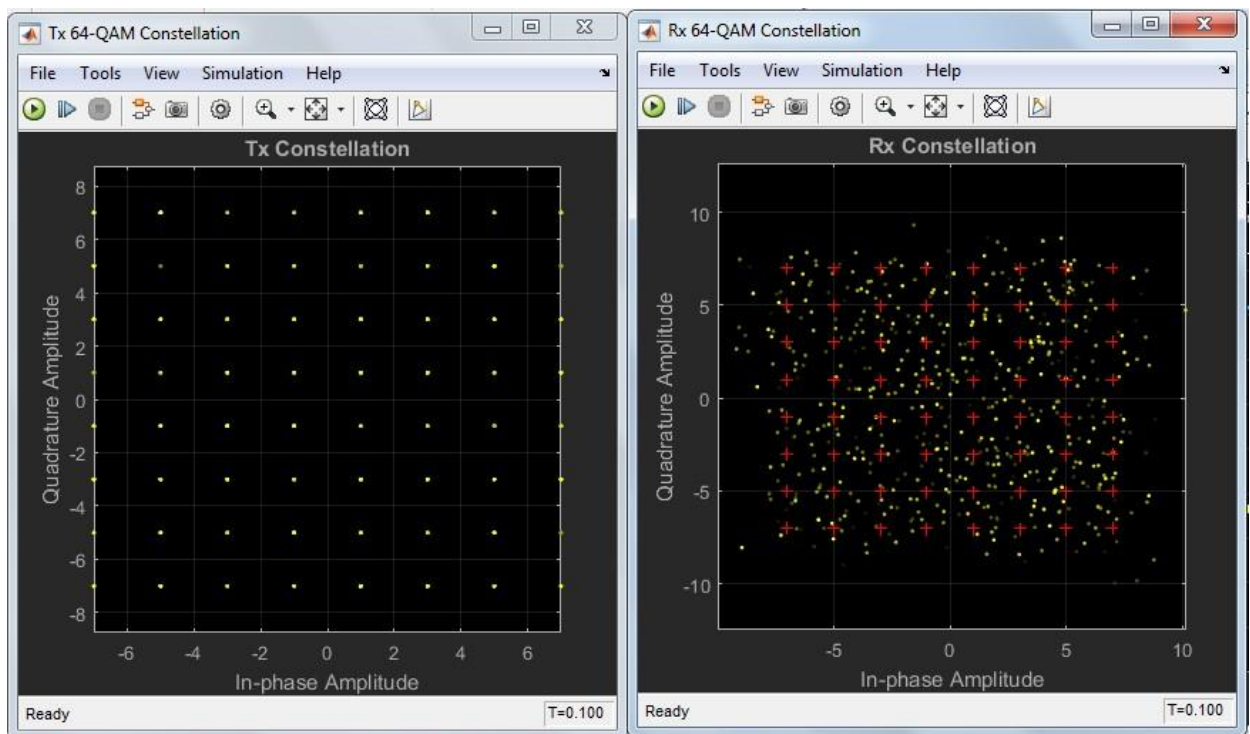
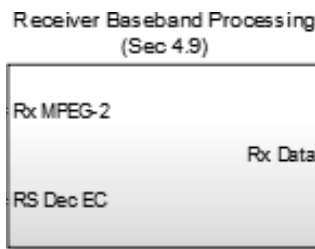


Рис. 12.11. Созвездия передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 5$  дБ.

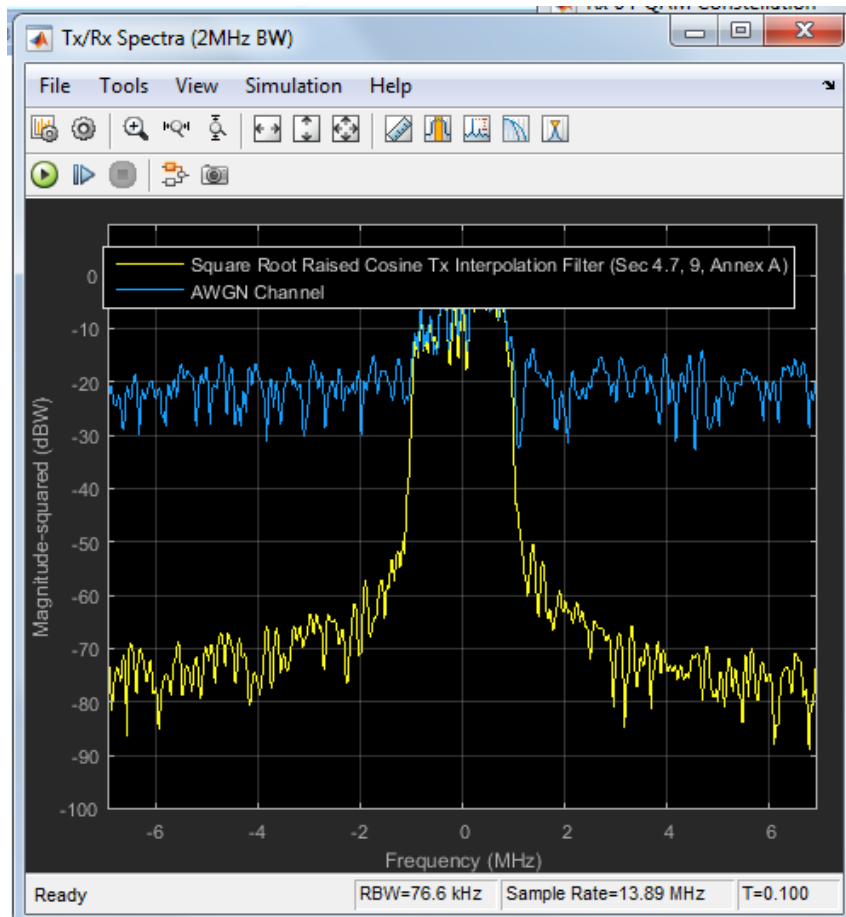


Рис. 12.12. Спектр передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 5$  дБ.

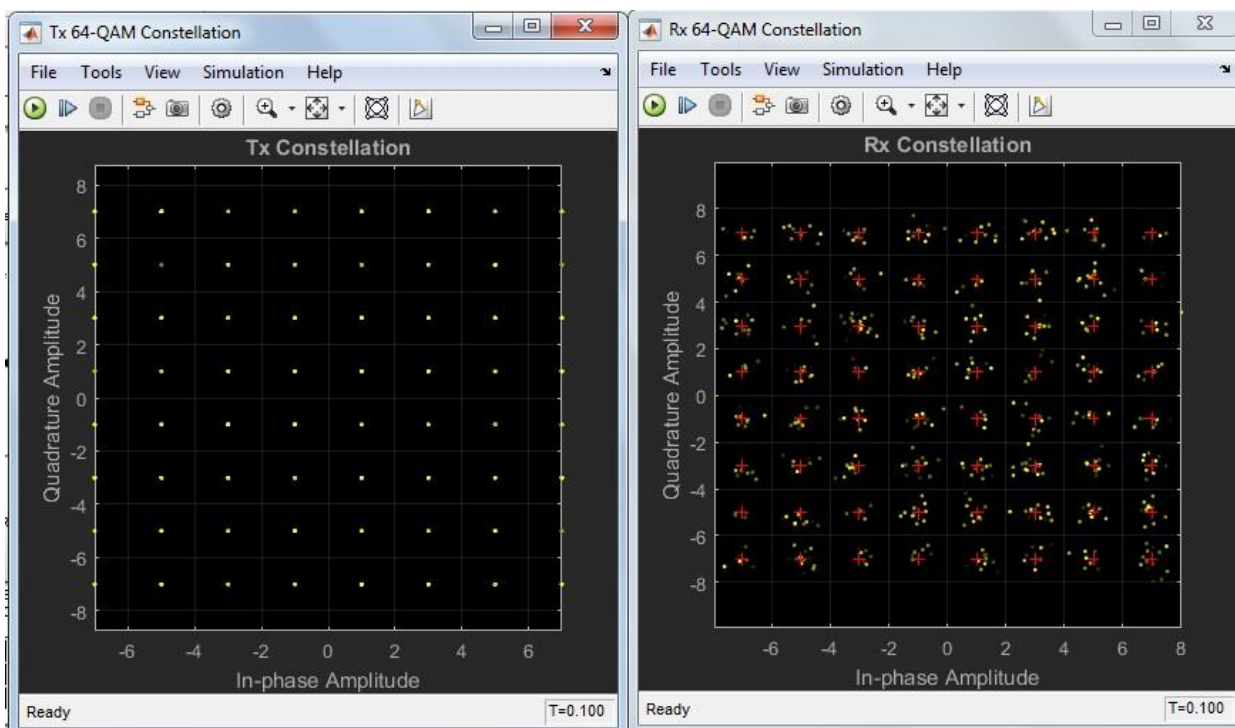


Рис. 12.13. Созвездия передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 15$  дБ.

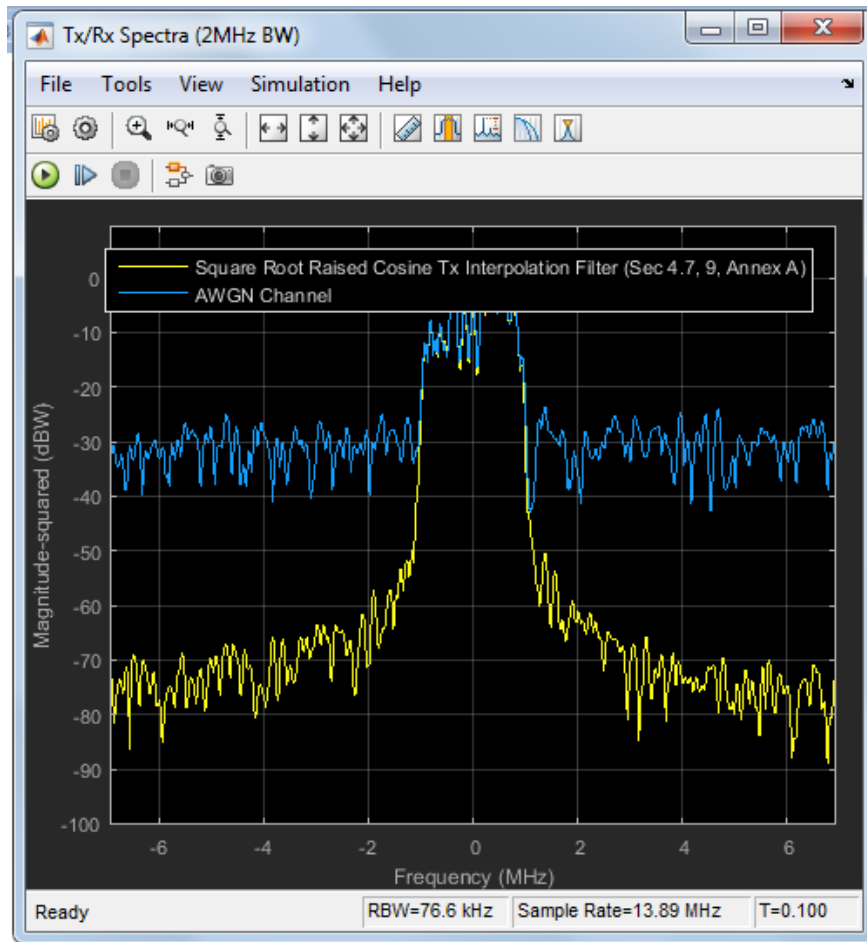


Рис. 12.14. Спектр передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 15$  дБ.

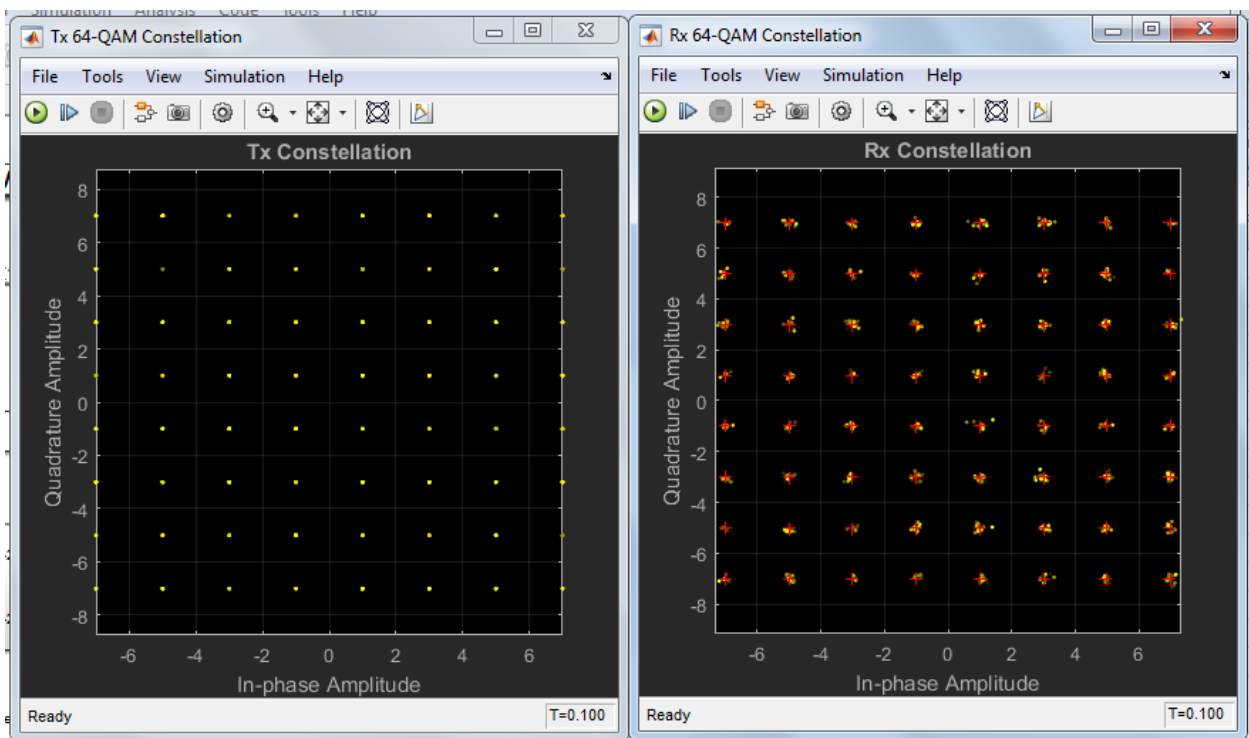


Рис. 12.15. Созвездия передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 19$  дБ.

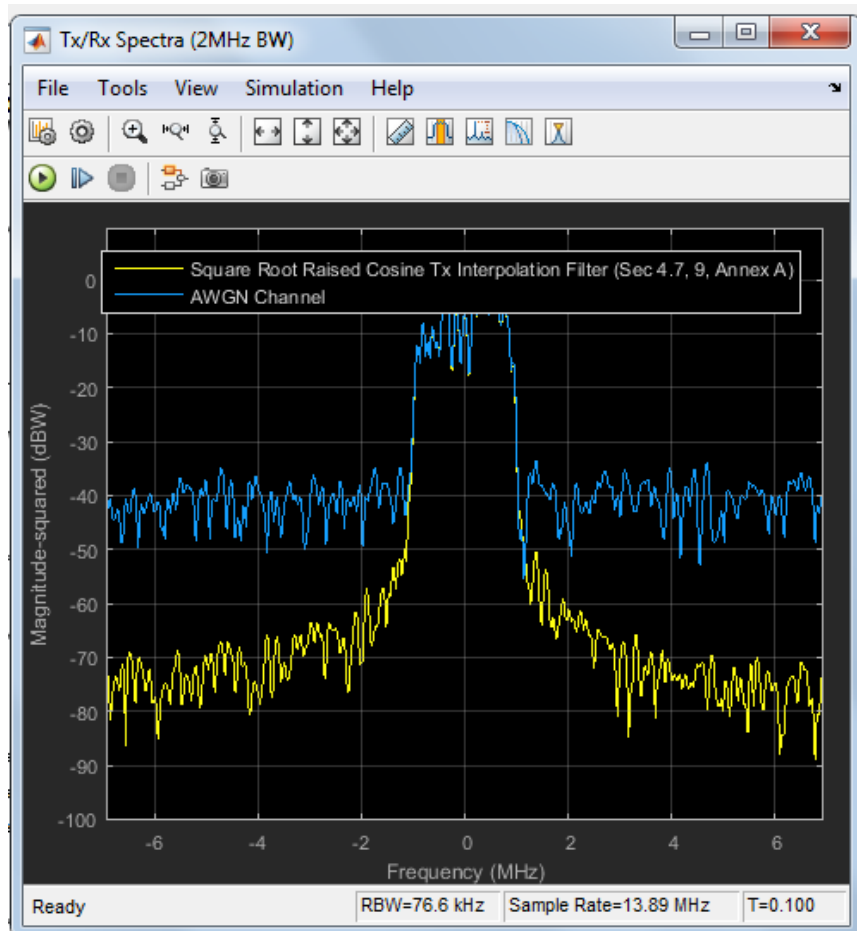


Рис. 12.16. Спектр передатчика и приёмника при  $E_b/N_0 = 19$  дБ.

Таблица 12.15. График зависимость BER от  $E_b/N_0$ .

$E_b/N_0$ , дБ	-10	-5	-2,5	-1	0	1	2	5	8	9	20
BER	0.4058	0.3359	0.2885	.2563	.03436	.01264	.001024	.0005E-6	.0009	0	0



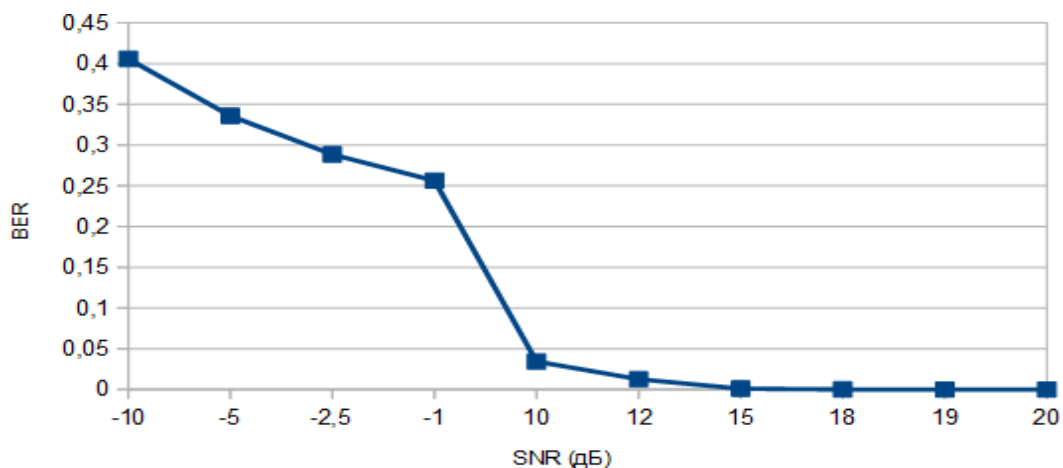


Рис. 12.17. Зависимость BER(SNR) для QAM-64.

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.

## 13.СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ DVB-H И СИСТЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЦИФРОВОГО МОБИЛЬНОГО ТВ- ВЕЩАНИЯ DVB-H2

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



## 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 частотный 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).

Таблица 13.1. 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 <sub>u</sub> , мс	224	448	896
Разнос между несущими 1/T <sub>u</sub> , Гц	4464	2232	1116
Разнос между несущими K <sub>min</sub> и K <sub>max</sub> , 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 13.2.

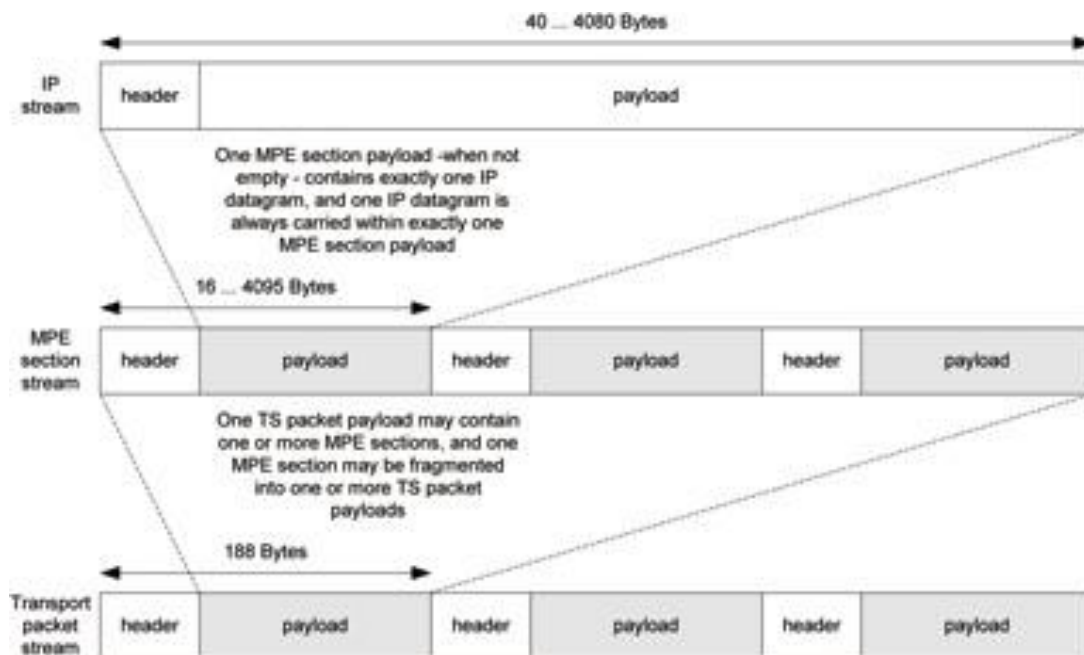


Рис. 13.2. Формат IP дейтаграммы

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 13.3.

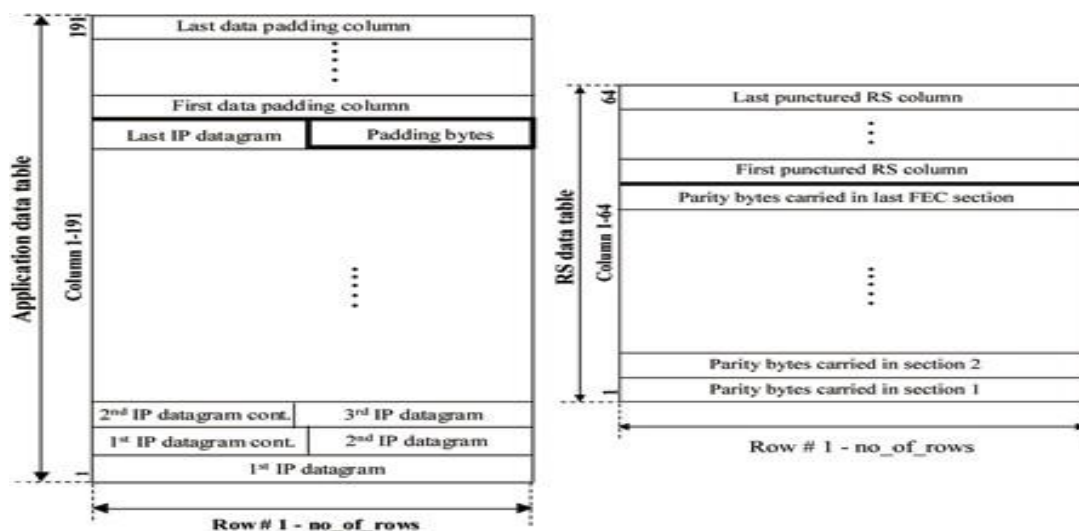


Рис. 13.3. Кодирование пакетов кодом Рида-Соломона

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 выполняется 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 нескольких 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.

Таблица 13.2. MPE-FEC кодированием в 3/4

Модуляция	Скорость кодирования	Защитный интервал			
		1/4	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



Таблица 13.3. 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		
Длительн ость защитного интервала $T_g$	51 2 T 56 ms	10 T24 112 ms	204 T8 224 ms	25 T6 28 ms	51 T2 56 ms	102 T4 112 ms	12 T8 14 ms	25 T6 28 ms	51 T2 56 ms	64 T T 7 ms	12 T8 14 ms	25 T6 28 ms
Полная символьная продол- жительность $T_S=\Delta+T_U$	25 60 T 280 ms	51 T20 560 ms	102 T40 1120 ms	23 T04 252 ms	46 T08 504 ms	921 T6 1008 ms	21 T76 238 ms	43 T52 476 ms	87 T04 952 ms	21 T12 231 ms	42 T24 462 ms	84 T48 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 вести 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

Система DVB-H была реализована в программной среде Matlab 2015a. Для того, чтобы запустить систему необходимо вести команду: `open_system('commdvbt_alt');`

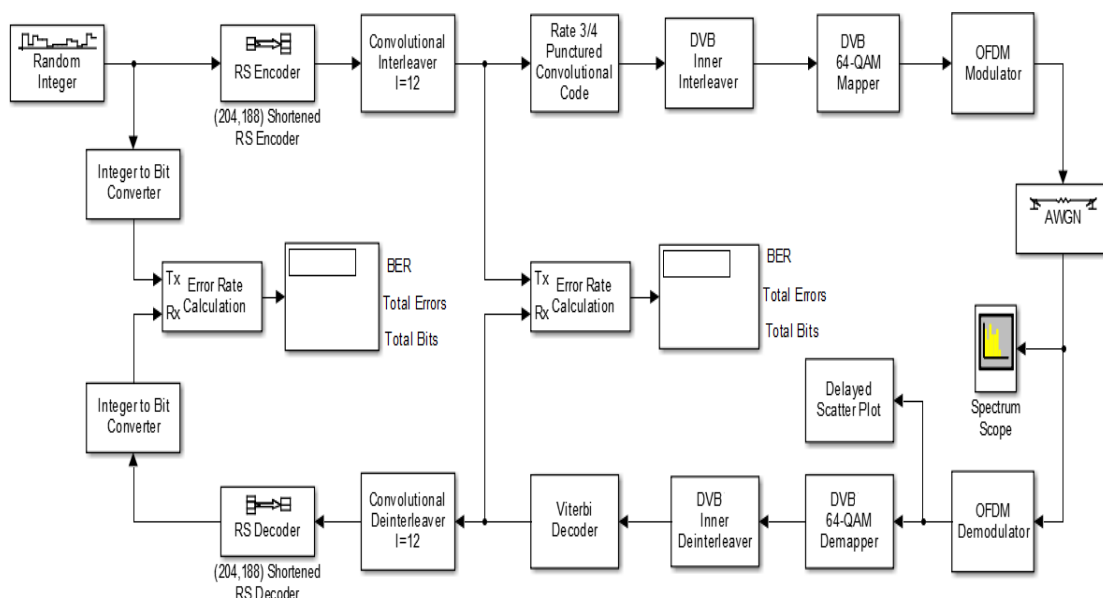


Рис. 13.4. Структурная схема DVB-H в режиме 2k Mode

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  $G_1=171$  и  $G_2=133$ .

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.

DVBM-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 .

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).

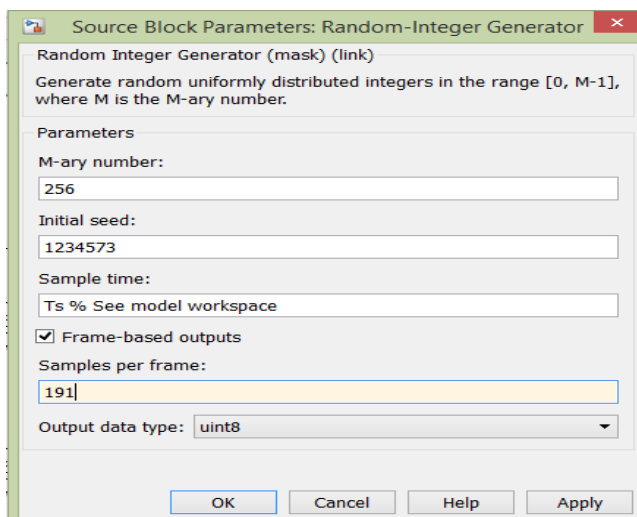


Рис. 13.5. Параметры Random-Integer Generator

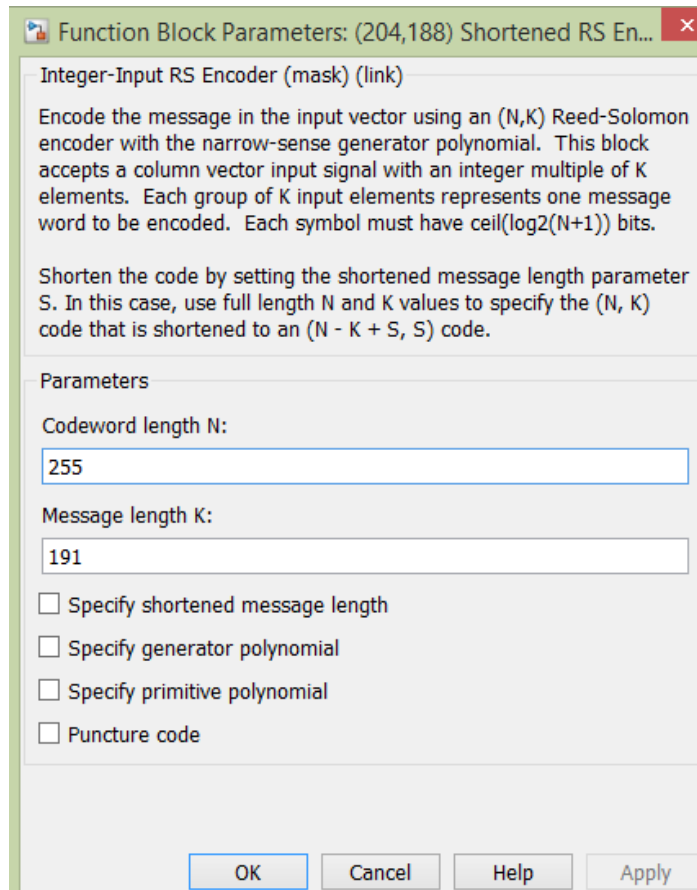


Рис. 13.6. Параметры RS Encoder-Decoder

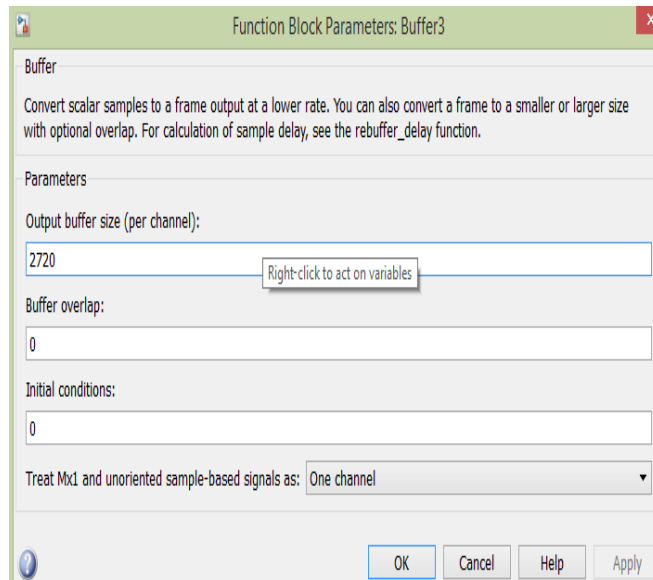


Рис. 13.7. Параметры DVB Inner Deinterleaver (Buffer3)

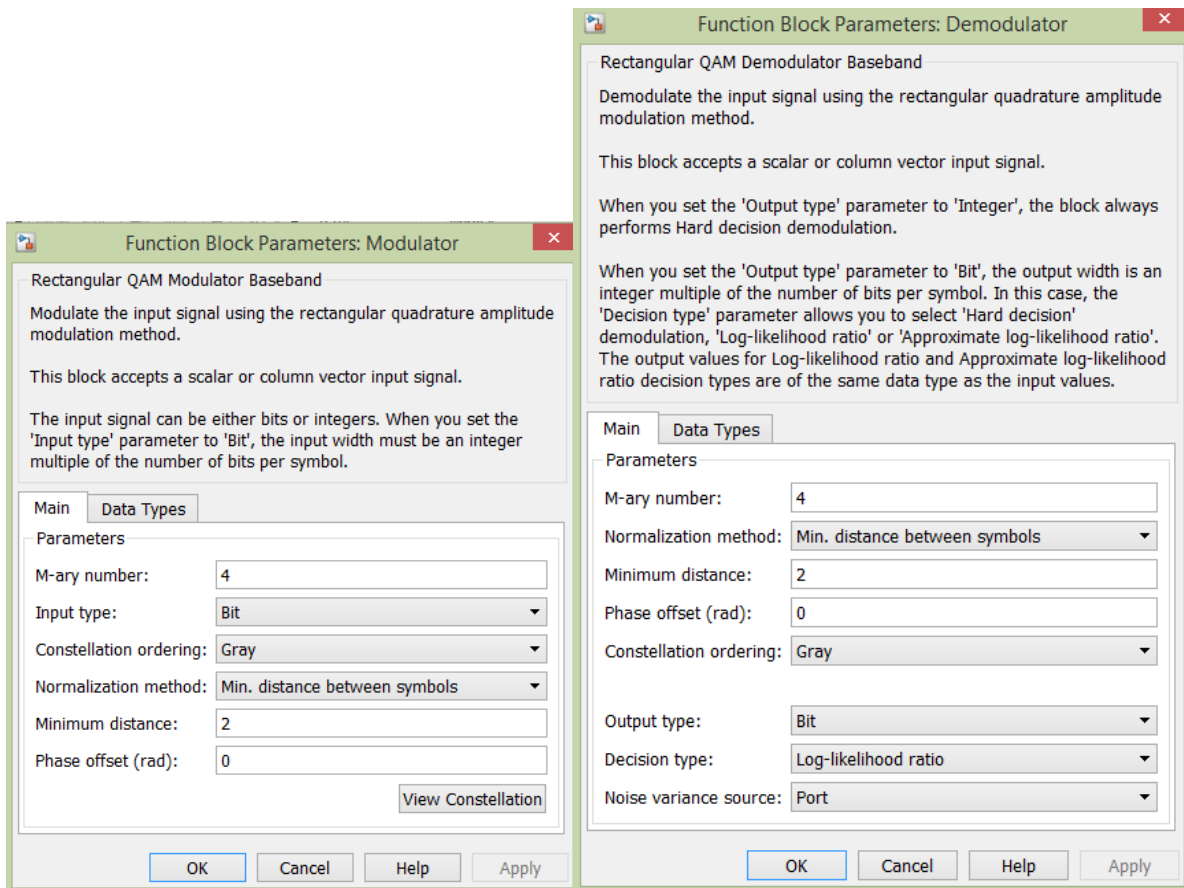


Рис. 13.8. Параметры QPSK модулятора

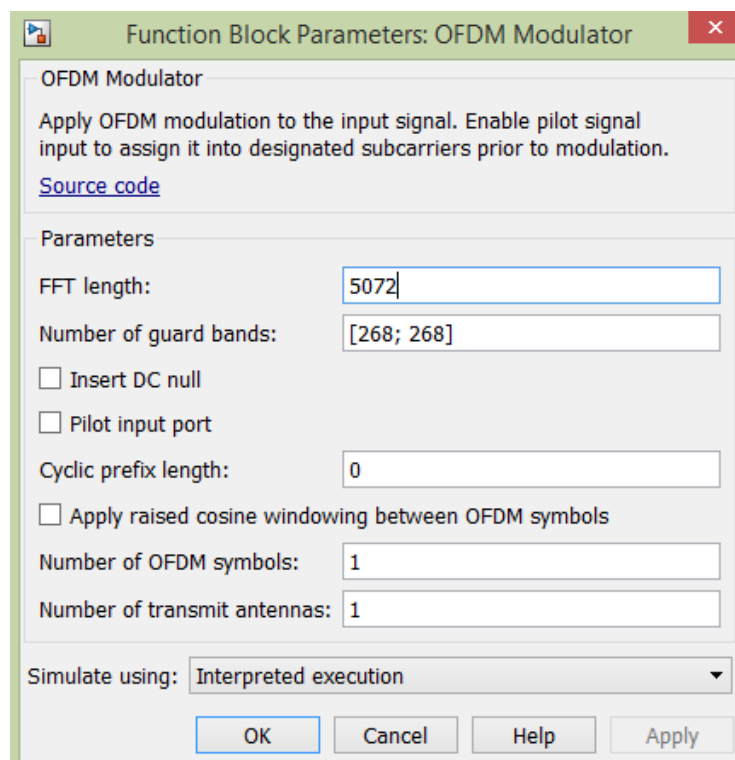


Рис. 13.9. Параметры OFDM modulator-demodulator

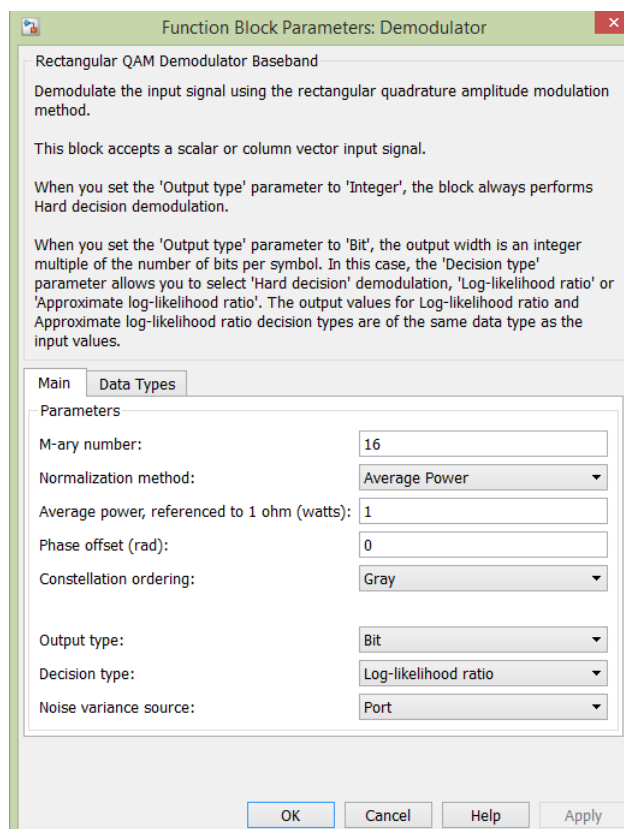
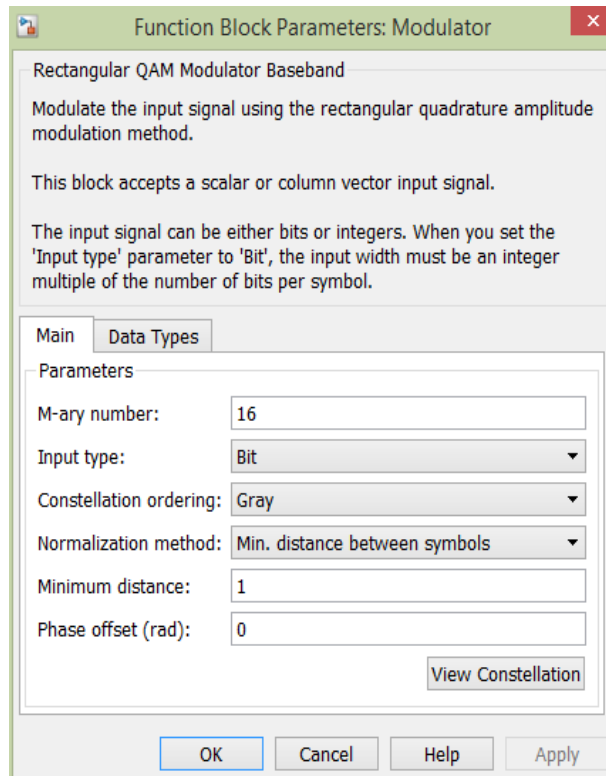


Рис. 13.10. Параметры 16-QAM модулятора

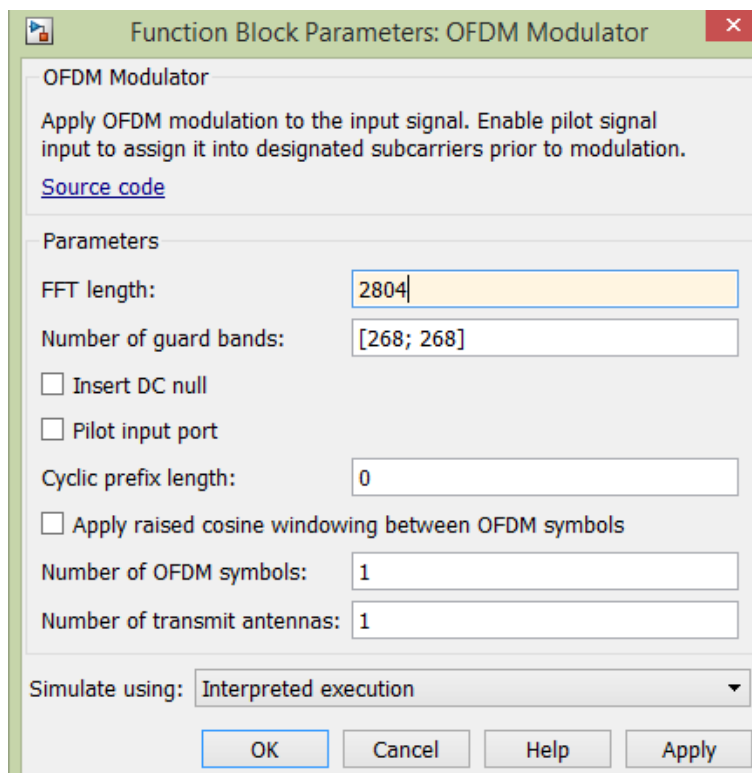


Рисунок 13.11. Параметры OFDM modulator-demodulator

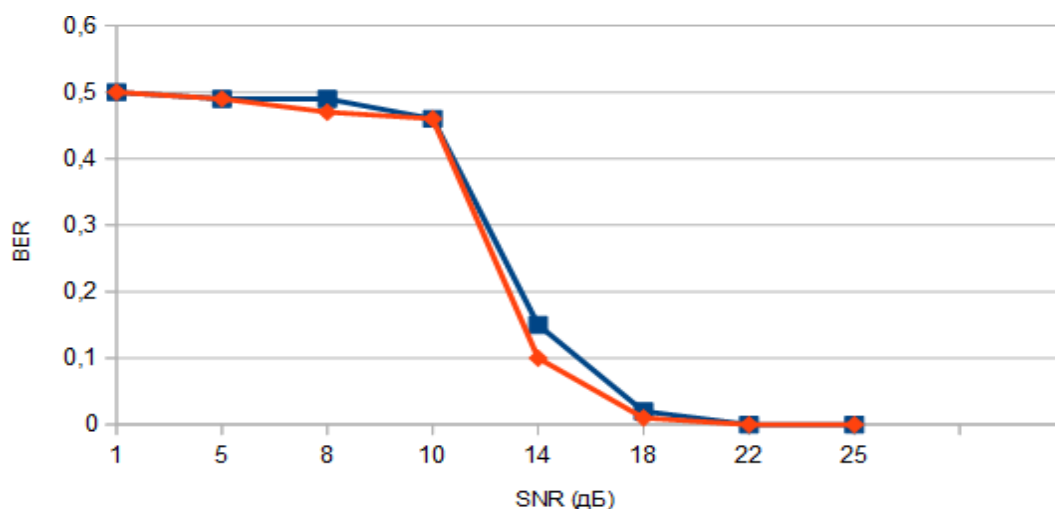


Рис. 13.12. Зависимость BER от SNR для системы DVB-H при использовании QPSK (синий) и 16-QAM (красный).

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.

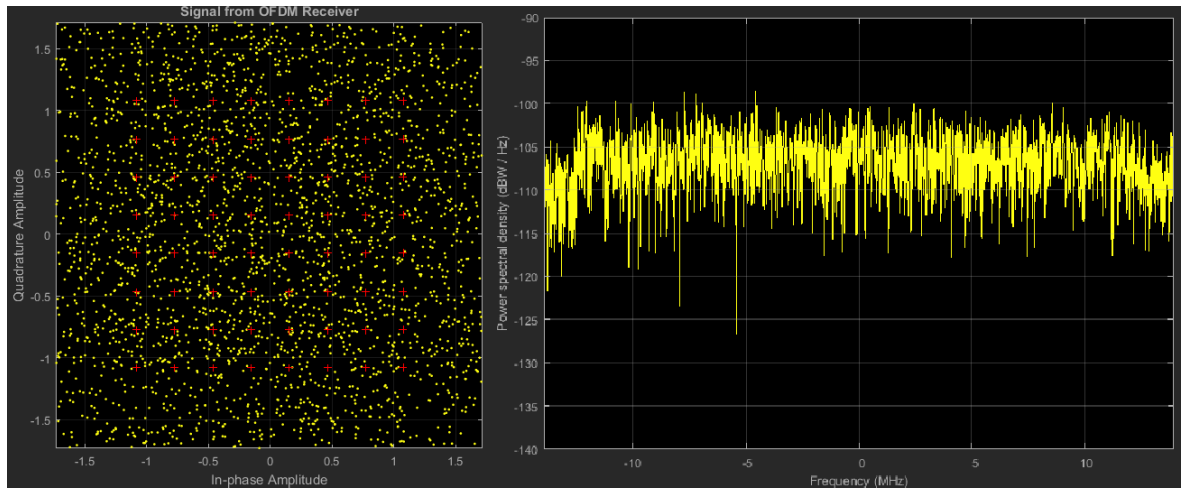


Рис. 13.13. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий QPSK при SNR=1 дБ

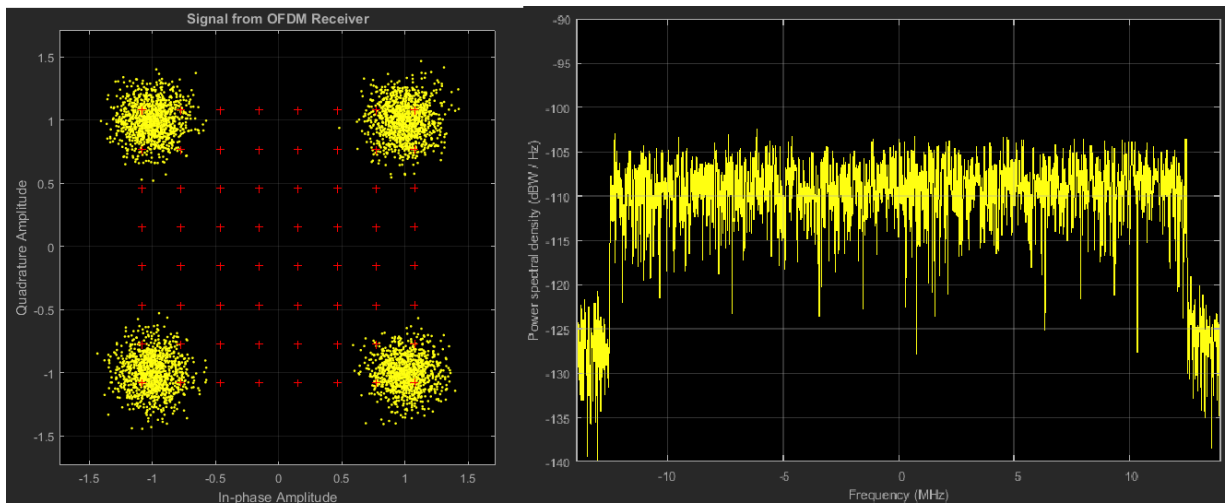


Рис. 13.14. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий QPSK при SNR=18Б

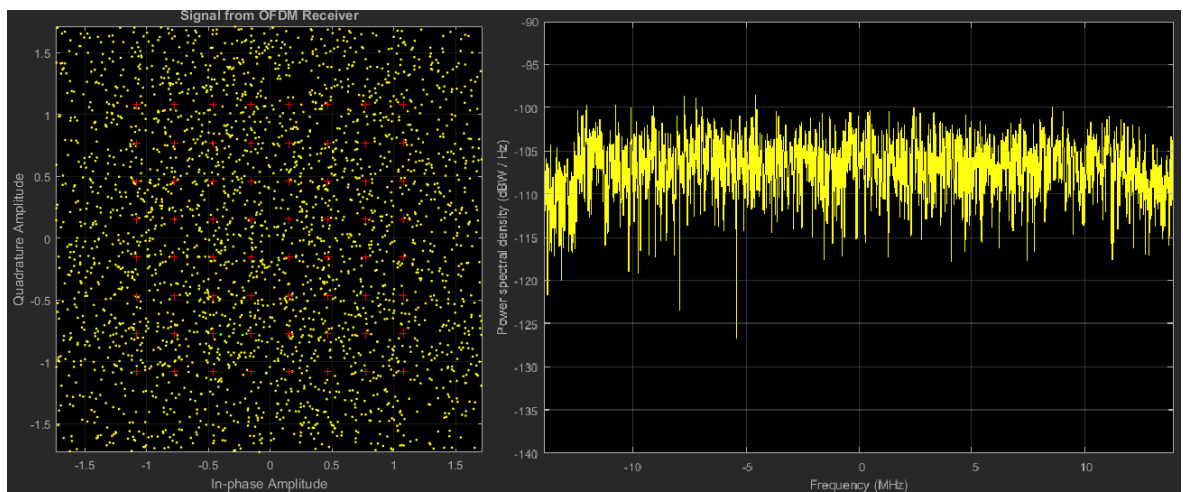


Рис. 13.15. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 16-QAM при SNR=1 дБ



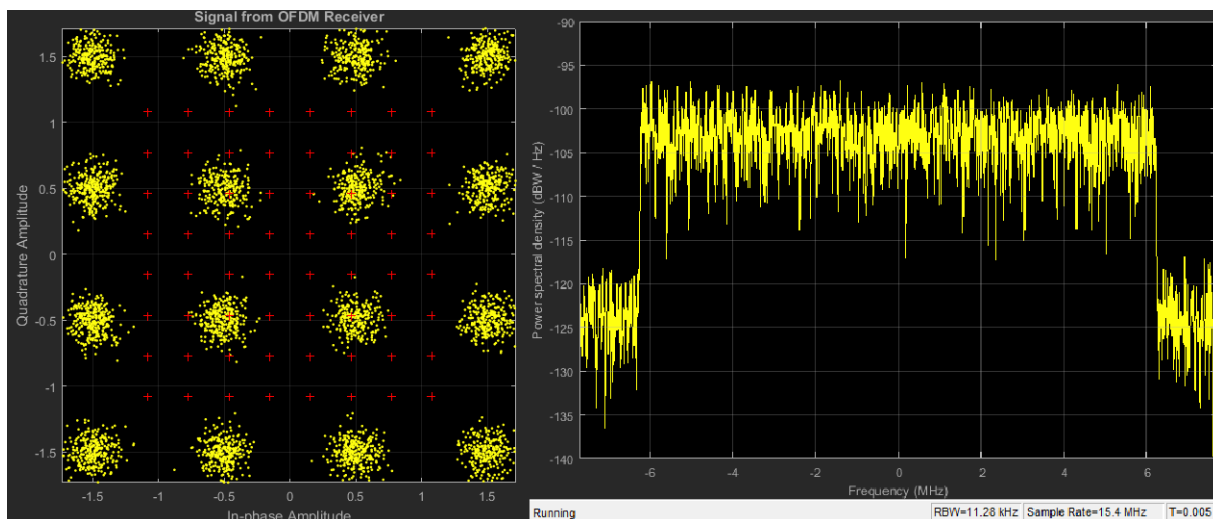


Рис. 13.16. Спектр OFDM-сигнала и диаграмма созвездий 16-QAM при SNR=18Б

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 3.9).

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.

## 14. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНОЙ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ DVB-RCS2

Цель работы: Разработка программного комплекса для визуализации и исследования модема спутниковой системы связи DVB-RCS2, включая модулятор 32APSK.

DVB (англ. Digital Video Broadcasting – цифровое видео вещание) – семейство стандартов цифрового телевидения, разработанных международным консорциумом DVB Project.

Стандарты, разработанные консорциумом DVB Project, делятся на группы по сфере применения. Каждая группа имеет сокращённое название с префиксом DVB – \*, где «\*» – буква, обозначающая сферу применения.

DVB–S – спутниковые сервисы;

DVB–S2 – спутниковое вещание второго поколения;

DVB–SH – спутниковое портативное вещание;

DVB–C2 – кабельное вещание второго поколения;

DVB–T2 – наземное эфирное вещание второго поколения;

DVB–H – мобильное вещание;

DVB–IPDC – передача данных через межсетевой протокол IP.

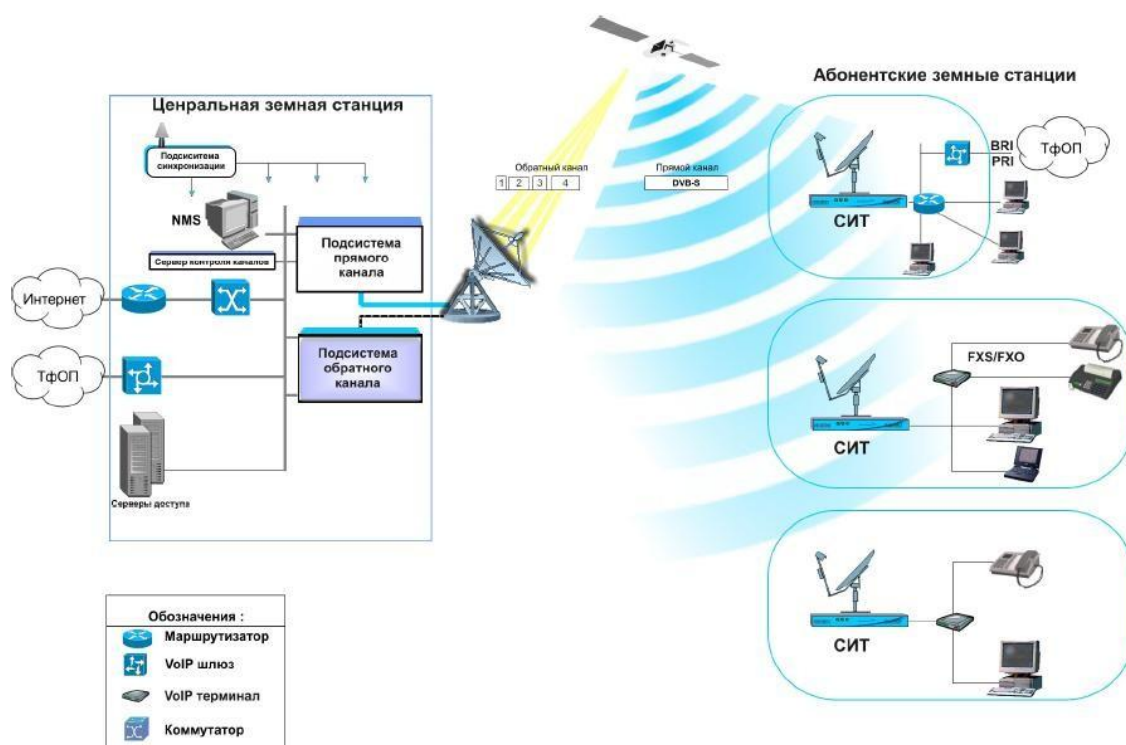
DVB-RCS (Digital Video Broadcasting — Return Channel via Satellite) – европейский стандарт телевидения, один из семейства стандартов DVB, утверждённый Европейским Институтом Стандартизации в области Связи (ETSI) в 2000 году.

DVB-S2 предназначен для ТВ-вещания, включая стандартное разрешение и высокой чёткости (HD). Внедрены интерактивные сервисы, такие как Internet access и (профессиональная) передача контента.

По сравнению с предыдущим поколением стандарт DVB-S2 имеет мощную схему кодирования, основанную на современном LDPC. Также технология имеет режимы VCM (Variable Coding and Modulation, переменное кодирование и модуляция) и ACM (Adaptive Coding and Modulation, адаптивное кодирование и модуляция), которые позволяют оптимизировать полосу частот, используя динамично изменяющиеся параметры. Ещё одним отличием является улучшенная модуляция 32APSK (амплитудная и фазовая манипуляция), увеличенные скорости трафика и специальный транспортный механизм для передачи IP-пакетов данных, включая потоки видео и аудио MPEG-4, при этом сохраняется обратная совместимость с базовым MPEG-2 TS.

## Стандарт DVB-RCS

DVB-RCS2 – это стандарт для обеспечения стандартизированной широкополосной интерактивной связи в качестве расширения систем цифрового спутникового видеовещания. Стандарт DVB-RCS предлагает прямой канал (Рисунок 2.1), основанный на формате данных DVB/MPEG-2, и обратный канал, на основе режима Многочастотного 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 8 Мбит/с в обратном канале с каждого удалённого терминала. В реальности же скорость прямого и обратного канала зависит от оборудования и пока зачастую далеко не доходит до указанного предела скоростей.



### Структурная схема топологии «звезда» стандарта DVB-RCS

В стандарте DVB-RCS использование технологий DVB-S(S2) для прямого канала продиктовано прежде всего экономикой. Недорогие массовые DVB-S2-компоненты уже существуют, в то время как возможно более эффективные схемы реализации фирменных стандартов наложат существенные стоимостные и временные издержки на развитие оборудования центральных станций и терминалов. Технология S2 позволяет использовать модемы с различными выходными интерфейсами. Это может быть, как широко распространённый Ethernet. Методы модуляции и канального кодирования DVB используются для первичного и вторичного распределения спутникового цифрового многопрограммного канала данных в полосах системы стационарной спутниковой связи (FSS – Fixed Satellite Service) и системы спутникового вещания (BSS – Broadcast Satellite

Service).

### Стандарт DVB-S

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.

В системе применена модуляция QPSK и защита от ошибок на основе свёрточного кода и сокращенного кода Рида-Соломона. Система может быть использована в спутниковых ретрансляторах с различной шириной полосы.

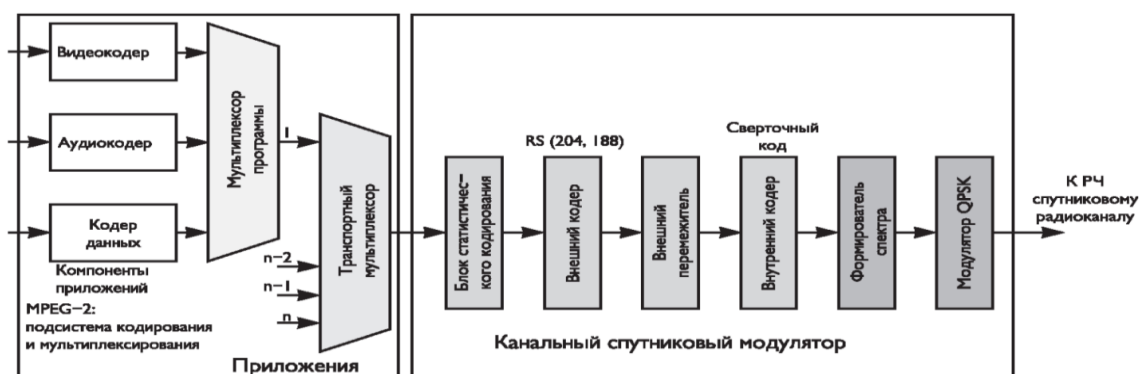


Рис. Структурная схема передающей части системы DVB-S

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)  $10^{-10} \div 10^{-11}$  на входе демультимплексора MPEG-2.

При адаптации сигнала к спутниковому каналу связи осуществляются следующие операции:

- адаптация транспортного мультиплексирования с использованием статистического кодирования, аналогичного используемому в системе DVB-T;

- внешнее кодирование с использованием кода Рида-Соломона RS (204,188,t = 8);
- свёрточное перемежение;
- внутреннее кодирование с использованием свёрточного кода с выкалыванием;
- система предусматривает свёрточное кодирование со скоростями кода 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 и 7/8;
- формирование сигнала в основной полосе частот;
- модуляция QPSK.

DVB-S, принятый еще в 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.

### **Причины появления DVB-S2**

Необходимость в пересмотре имеющихся стандартов была обусловлена несколькими причинами. Важнейшим фактором стали планы массового запуска ТВЧ. Сегодня, когда подавляющее большинство европейских программ передается в стандартном разрешении, дефицита частотного ресурса, выделенного в Европе для ТВ вещания через спутник, в целом не наблюдается. Но, как показывают расчеты, если все спутниковые программы будут переведены в ТВЧ, то этого ресурса окажется недостаточно, даже при переходе к более совершенным системам компрессии ТВ сигнала. Таким образом, перспектива появления ТВЧ потребовала разработки форматов канального кодирования, более эффективно использующих спектр.

Вторая причина необходимости нового стандарта – неудовлетворительная работа имеющихся приемных систем с сигналами Ka-диапазона. Качество приема в этом диапазоне очень сильно зависит от погодных условий, в первую очередь, от дождя. Поэтому для трансляций в этом диапазоне часто требуется более высокая помехозащищенность, чем в C- и Ku-диапазонах.

Третья причина – появление интерактивных спутниковых сетей с адресными услугами, чему, в частности, способствовало развитие технологии точечных лучей. Такие сети требуют большого транспортного ресурса, и оптимизировать его использование можно, адаптировав параметры каждого адресного потока к условиям приема конкретного адресата.

Старые стандарты таких возможностей не предоставляют.

Таким образом, от нового стандарта требовалось следующее:

- Во-первых, он должен был повысить эффективность использования транспортного канала. То есть дать возможность в полосе стандартного канала передавать больше бит полезной информации.

- Во-вторых, он должен был предоставить расширенные возможности обмена скорости передачи полезной информации на помехоустойчивость.

- В-третьих, стандарт должен был допускать дифференцированный подход к выбору транспортных параметров для разных услуг, передаваемых в одном канале.

Кроме того, он должен был обеспечить совместимость с прежними стандартами и пути плавной миграции от старого оборудования к новому.

Первые два требования удалось выполнить за счет введения в стандарт более разнообразных схем модуляции, использования более эффективных систем защитного кодирования и введения дополнительных коэффициентов скругления, обеспечивающих более крутые фронты модулированного сигнала.

Гибкость формирования канала была достигнута теми же методами, что и эффективность использование спектра методами, а также за счет введения режимов VCM (Variable Coding and Modulation) и ACM (Adaptive Coding and Modulation). Первый режим допускает разный уровень помехозащищенности услуг, передаваемых в одном канале, а второй – дополнительную возможность адаптации транспортных параметров к текущим условиям приема услуги. Режим ACM предназначен для сетей с обратным каналом, где приемные системы имеют возможность переправлять на головную станцию информацию об условиях приема.

В результате был создан универсальный стандарт, на базе которого могут строиться сети для распространения ТВ программ стандартной или высокой четкости, сети для предоставления интерактивных услуг, например, доступа в Интернет, сети для профессиональных приложений, таких как передача цифрового ТВ от студии к студии, сбор новостей и раздача сигнала на эфирные ретрансляторы. Новый стандарт также удобен для формирования сетей передачи данных и создания IP-магистралей.

Как и большинство многофункциональных стандартов, он представляет собой набор инструментов, которые можно использовать в разных сочетаниях. Такой принцип построения делает стандарт максимально гибким и не сильно перегружает процессоры приемников. При нынешнем развитии силиконовых технологий все функции приемника можно реализовать на одном чипе.

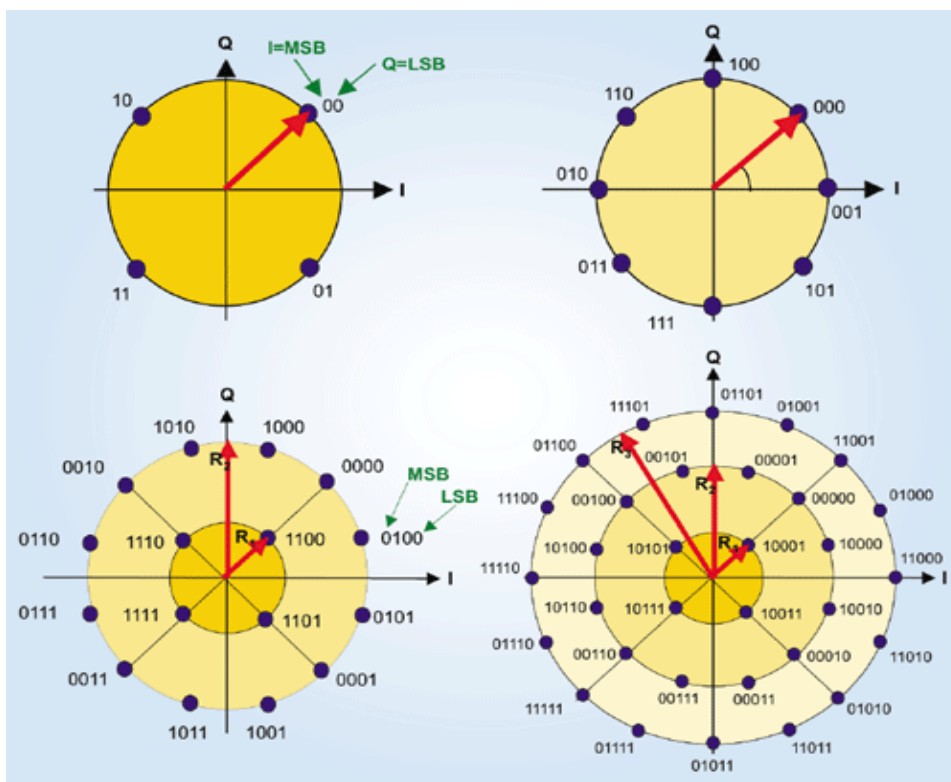
Большинство эффективных механизмов, заложенных в DVB-S2, оказались

несовместимыми со старыми стандартами. Потому, для выполнения требования совместимости вниз, разработчики ввели в стандарт два режима. Один – совместимый вниз, но менее эффективный, а другой, использующий все новые возможности, но не позволяющий использовать приемники стандарта DVB-S.

Первый рекомендуется для предоставления традиционных услуг, на период миграции к новому стандарту, а второй – для применения в профессиональных сетях и для передачи новых услуг, которые невозможно принять старыми приемниками.

### Схемы модуляции и способы помехозащитного кодирования

Новый стандарт предусматривает четыре возможных схемы модуляции, которые изображены на рисунке.



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, близком 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 предсказаний, а на приемной стороне должен быть обеспечен более высокий уровень отношения сигнал/шум. Символы внутри констелляционного поля APSK модулированного сигнала размещены по окружностям. Такой вариант является наиболее помехоустойчивым в плане передачи амплитуды символа и позволяет использовать ретрансляторы в режимах, близких к точке насыщения.

Обратим внимание на то, что, по сравнению с QPSK, верхняя схема модуляции, 32APSK, позволяет повысить общую скорость потока в 2.5 раза.

Одновременно с введением более высоких уровней модуляции стандарт предусматривает возможность применения двух дополнительных коэффициентов скругления  $\alpha$ . К используемому в DVB-S  $\alpha=0.35$  в новом стандарте добавлены коэффициенты  $\alpha = 0.20$  и  $\alpha = 0.25$ . Новые, более низкие значения коэффициентов обеспечивают большую крутизну импульсов, что позволяет использовать спектр более эффективно. С другой стороны, снижение  $\alpha$  способствует повышению нелинейных искажений, что особенно сказывается при передаче одной несущей на транспондер. Поэтому конкретное значение коэффициента выбирается с учетом всех параметров передачи.

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-Bhaidhuri-Nocquenghem, BCH), а в качестве внутренней, вместо сверхточного кода, – код с низкой плотностью проверок на четность Low Density Parity Check Codes – LDPC).

LDPC – один из вариантов "турбо" кодов, изобретенный еще в 1960 году и получивший свое второе рождение в середине 1990-х. Он был выбран путем компьютерного моделирования из семи опробованных вариантов турбо кодов. 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, одиннадцатый – один контрольный бит на девять полезных.

Для дополнительного снижения частоты ошибки используется внешний уровень

кодозащиты BCH, работающий при малой плотности ошибок. В большинстве режимов код позволяет исправлять до 12 ошибок, но в некоторых – до 8 или до 10 ошибок.

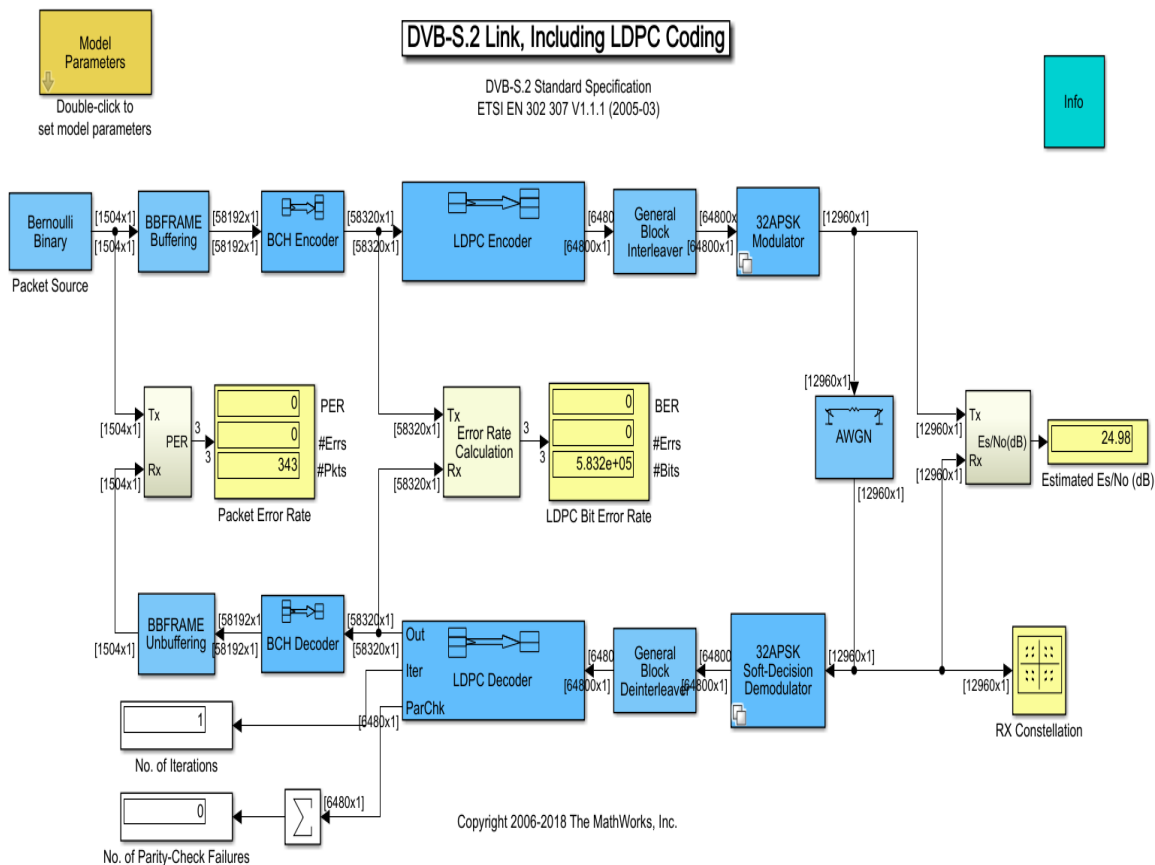
BCH, так же, как и код Рида-Соломона, представляет собой алгебраический код, описываемый определенными полиномами. Но, в отличие от кода Рида-Соломона, BCH исправляет одиночные, а не пакетные ошибки и может накладываться на более длинные последовательности.

Новая пара кодов обеспечивают более эффективное использование канального ресурса, чем коды DVB-S. Как отмечают разработчики стандарта, она позволяет работать при уровнях  $E_b/N_0$  (цифровой эквивалент  $C/N$ ) 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 (стандартная скорость передачи ТВ компрессированного в MPEG-2). С другой стороны, такой уровень ошибки является допустимым для подавляющего большинства приложений, а большая достоверность при необходимости может быть обеспечена самим приложением. По существу, в стандарт DVB-S заложен избыточный уровень достоверности. Это связано с особенностями работы кода Рида-Соломона, который либо восстанавливает принимаемую последовательность с высокой точностью, либо не восстанавливает ее вовсе.

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 программного комплекса DVB-RCS2 и результаты моделирования**

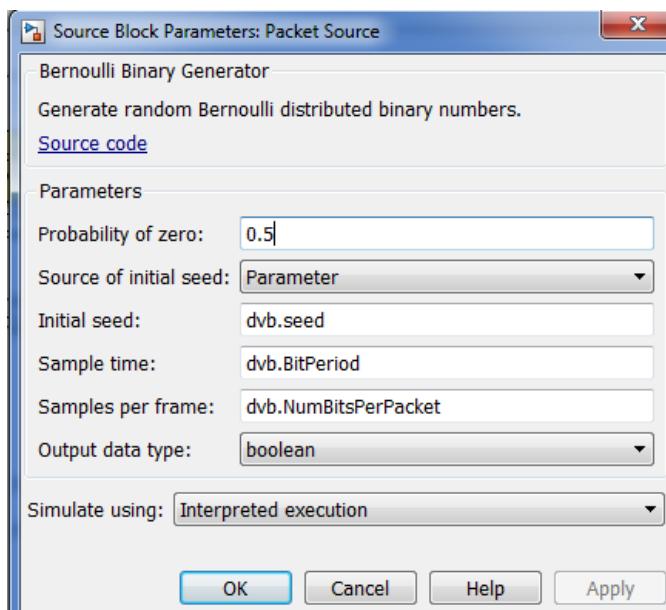
Также для решения поставленной задачи было проведено моделирование с использованием программного пакета MATLAB Simulink (commdvbs2). Структурная схема канала DVB-S2 приведена на рисунке.



Simulink модель канала DVB-S2

Схема включает в себя следующие функциональные блоки:

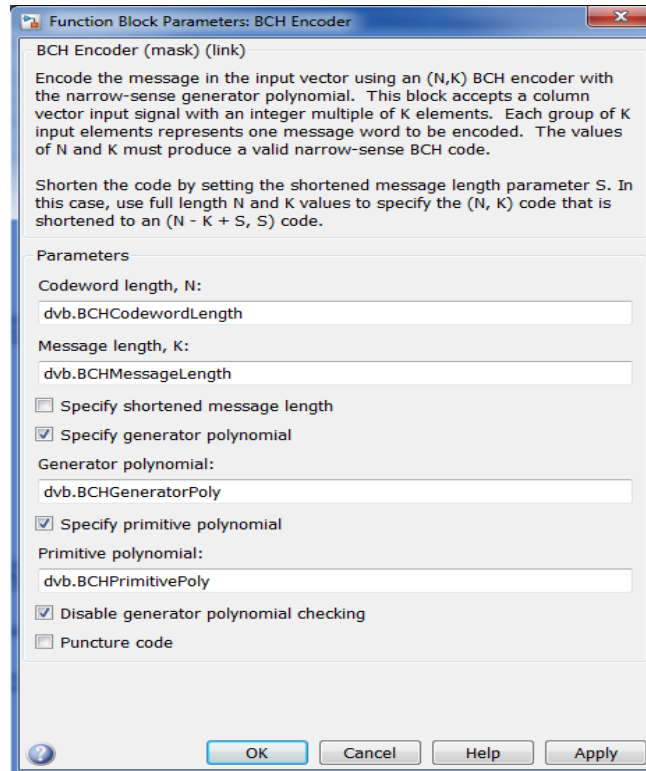
Bernoulli Binary Generator – Генератор псевдослучайной последовательности, имитирующей входной сигнал.



Окно блока Bernoulli Binary Generator

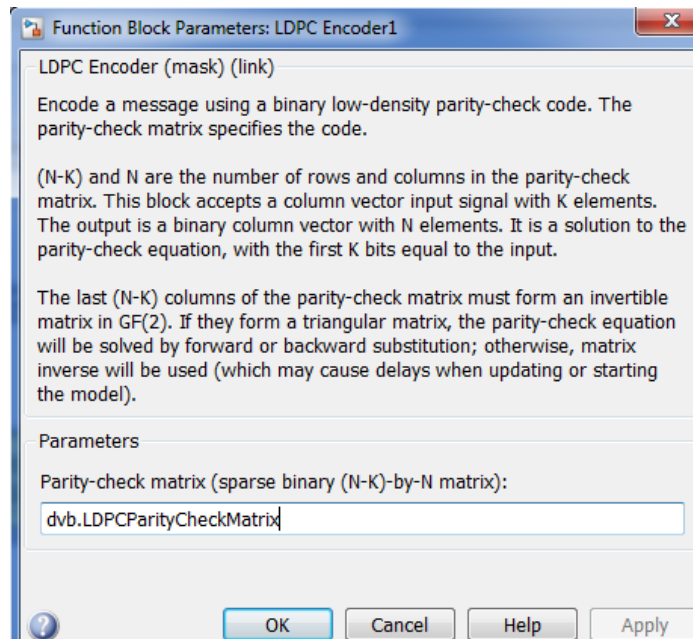
Буфер – с выхода генератора пакеты буферизуется, создавая базовый диапазон кадра (BBFRAME).

Кодер (декодер) BCH – осуществляет защиту информации от ошибок



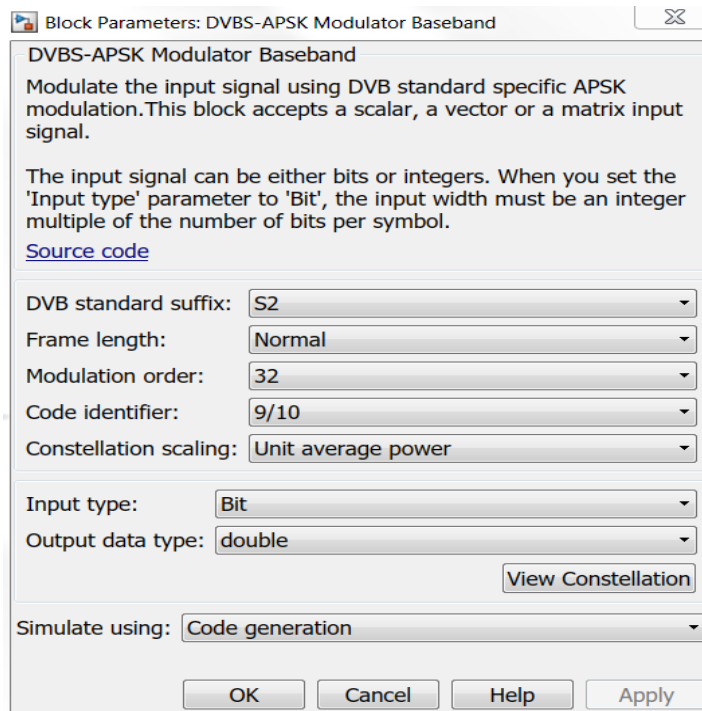
Окно блока BCH coder/decoder

LDPC coder (decoder) – кодирование с проверкой на чётность.



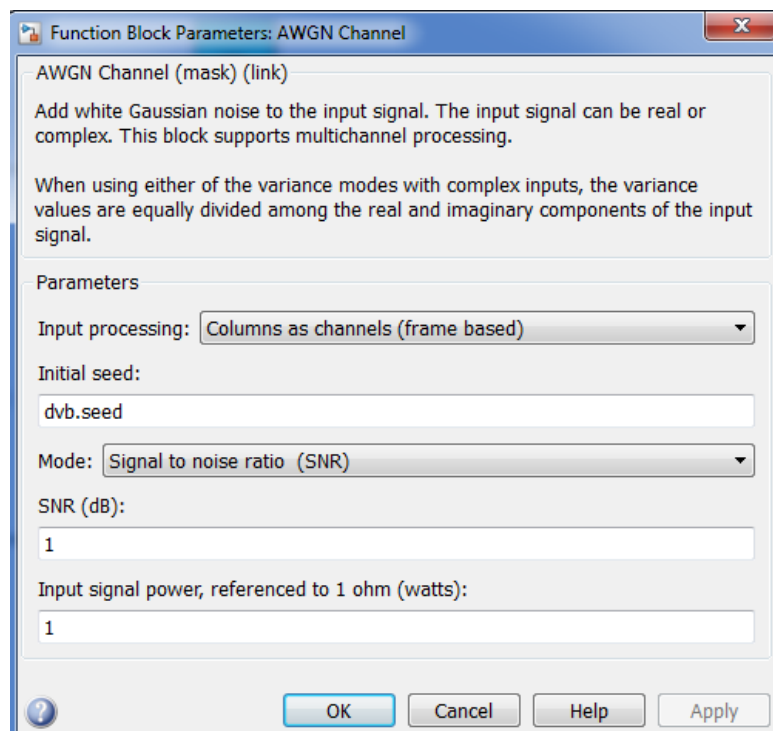
Окно блока LDPC coder

32APSK – модулятор (демодулятор) кодовой последовательности.



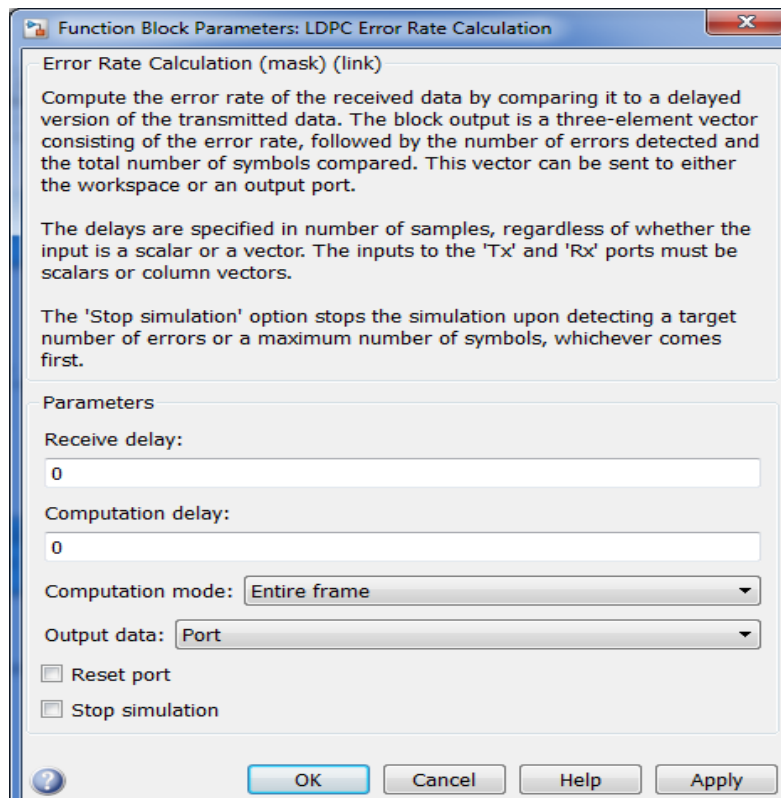
Окно блока 32APSK модулятор

AWGN – Линия передачи с аддитивным белым Гауссовским шумом



Окно блока AWGN

LDPC Bit Error Rate – Блок подсчёта количества ошибок



Окно блока LDPC Bit Error Rate

В ходе проделанной работы был исследован стандарт DVB-RCS разработанный на основе стандарта DVB-S2, а также разработан аппаратно- программный комплекс для рассмотрения данного стандарта с различными видами модуляции. Основываясь на результатах моделирования были построены кривые зависимости битовой ошибки от отношения сигнал-шум и созвездия для различных видов модуляций, применяемых в стандарте DVB-RCS. На основе этих графиков были сделаны следующие выводы:

1) Из графиков зависимости BER от SNR можно сделать вывод о том, что при увеличении арности модуляции скорость передаваемой информации увеличивается, но в тоже время уменьшается помехозащищённость сигнала (увеличивается количество ошибок).

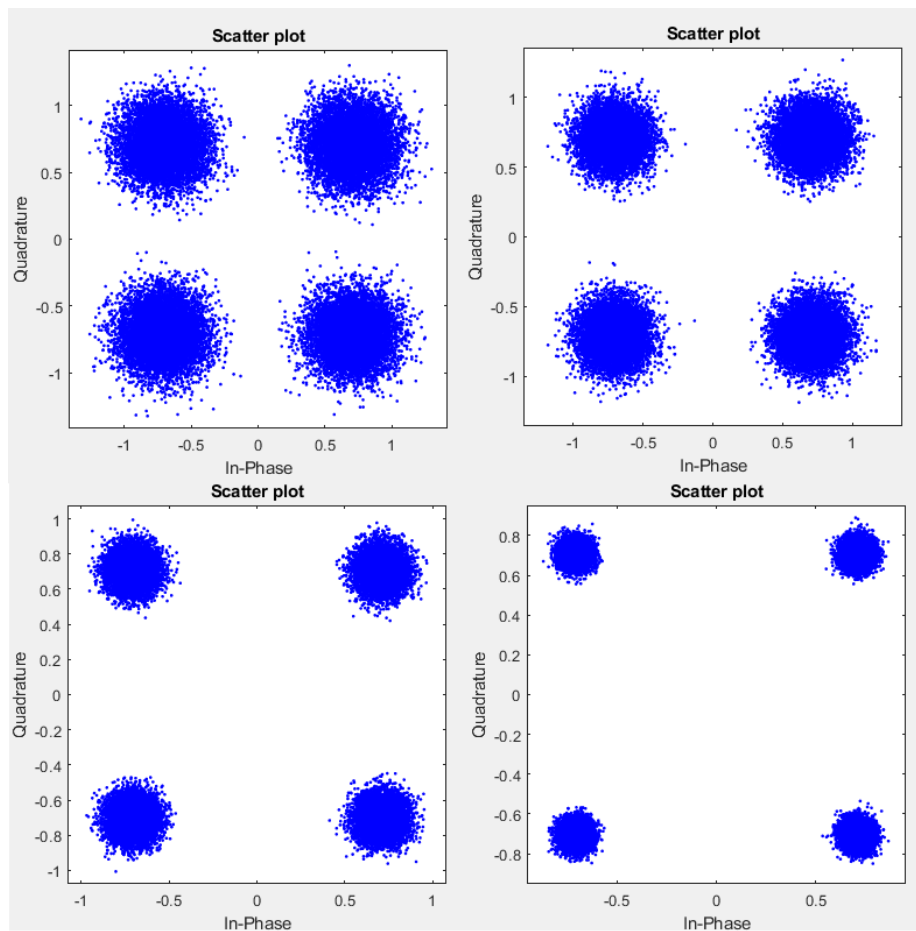
2) Рассматривая созвездия модуляций при различном отношении сигнал/шум можно сделать вывод, что при увеличении SNR точки на созвездии сходятся, и как следствие, при приёме количество ошибок уменьшается.

Уменьшение числа ошибок достигается использованием сигнально-кодовых конструкций в стандарте DVB-RCS. Совместное использование цифровых модуляций QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK - и каскадных кодов BCH - LDPC позволяет снизить битовые ошибки.

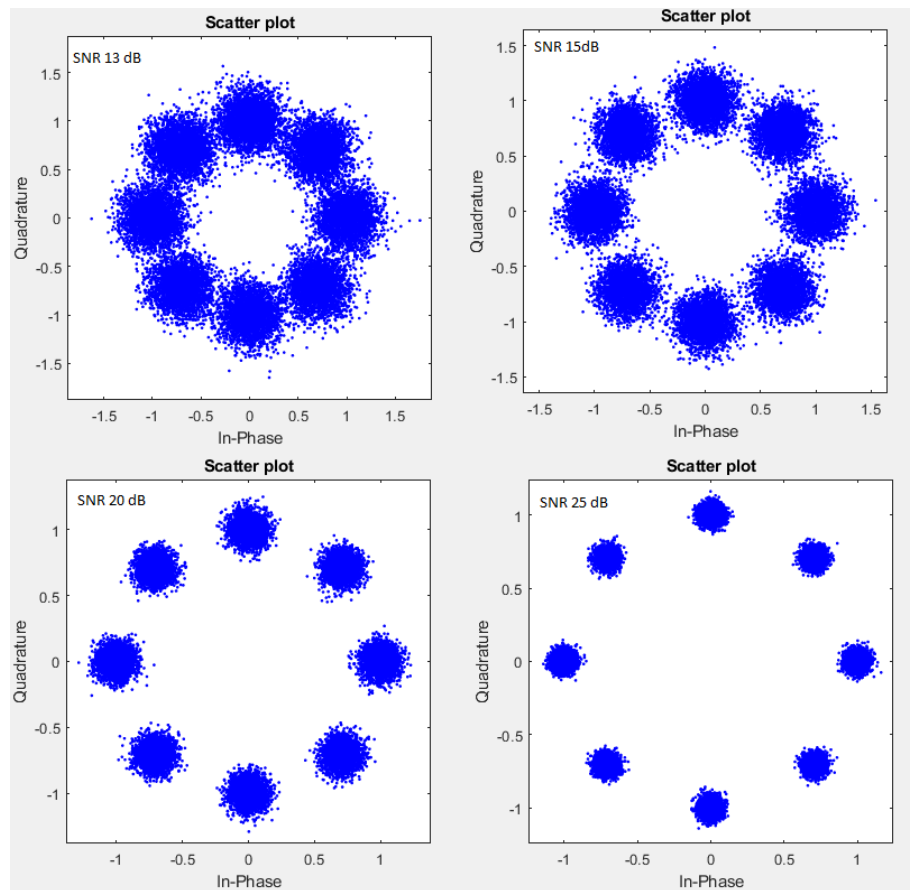
Схема кодирования основана на взаимной связи кодов LDPC и BCH. Коды LDPC, могут обеспечить чрезвычайно низкие частоты появления ошибок вблизи пропускной способности канала, используя алгоритм итеративного декодирования с низкой

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.

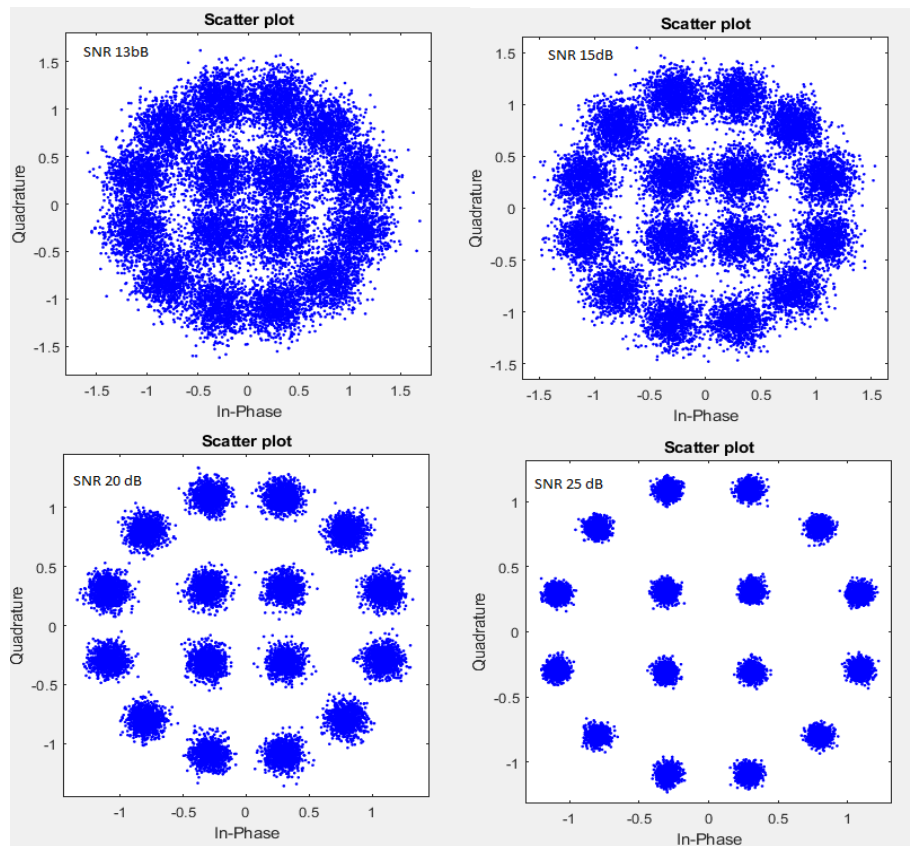
Созвездия, полученные при модулировании, для различных отношений энергии бита к спектральной мощности шума (SNR) представлены на рисунках:



Созвездия QPSK 9/10 для разных SNR

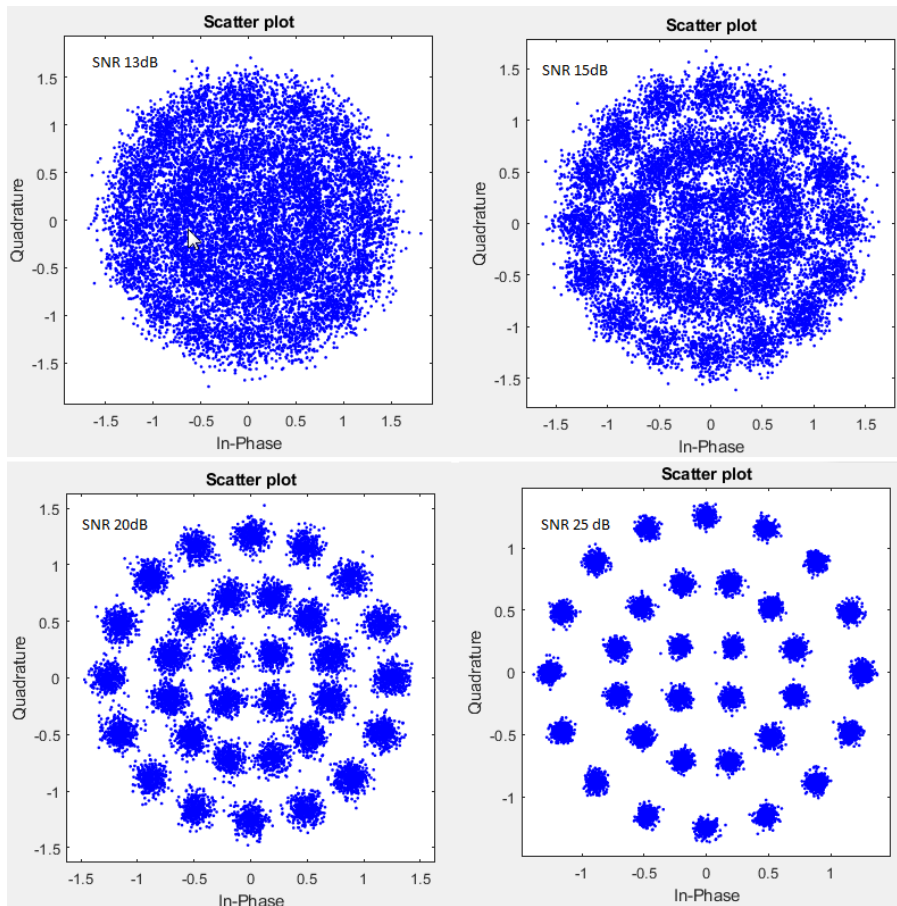


Созвездия 8PSK 9/10 для разных SNR



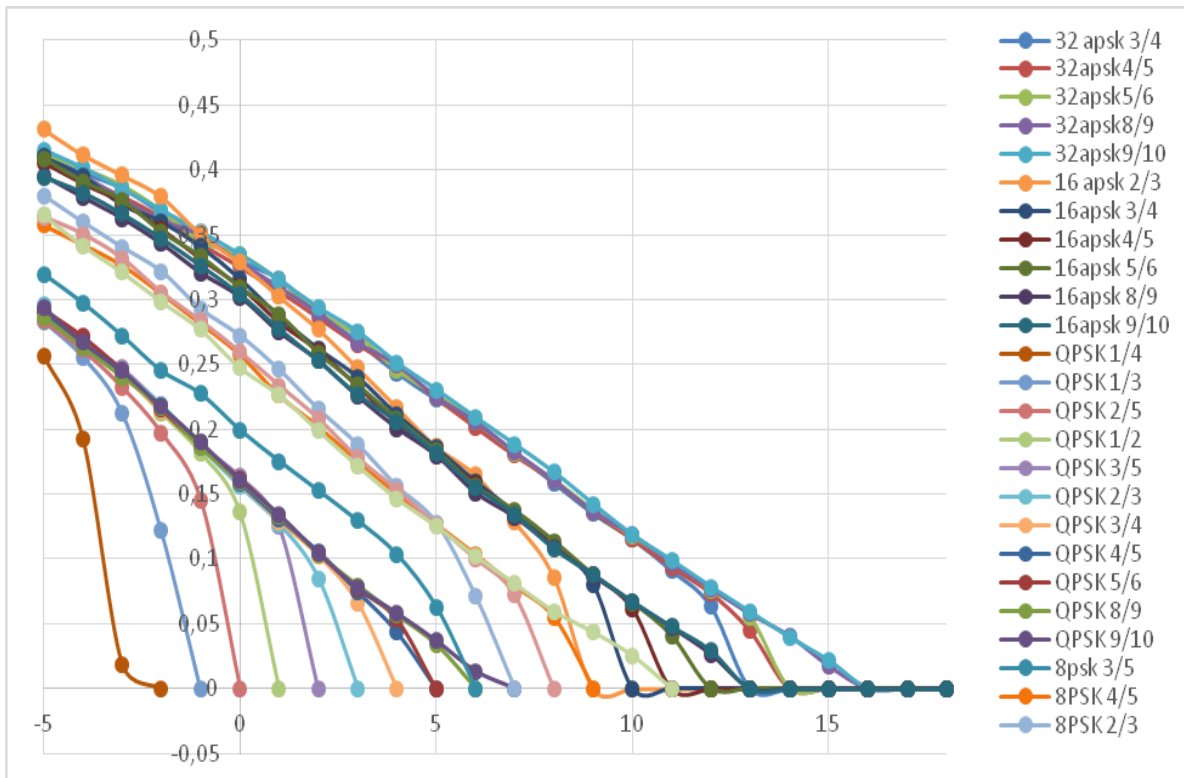
Созвездия 16APSK 9/10 для разных SNR





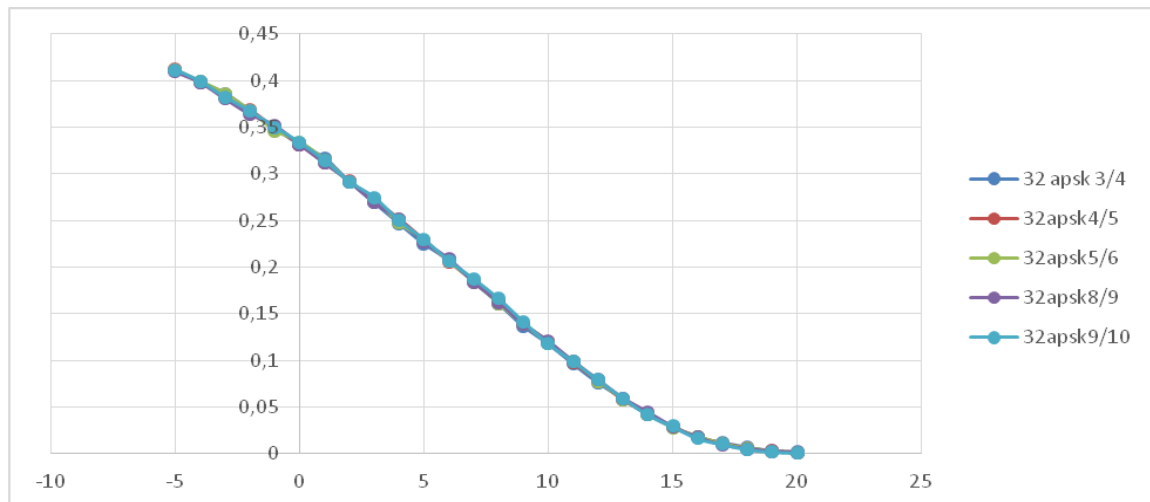
Созвездия 32APSK 9/10 для разных SNR

В результате моделирования получены зависимости BER от SNR для различных скоростей кодирования LDPC.



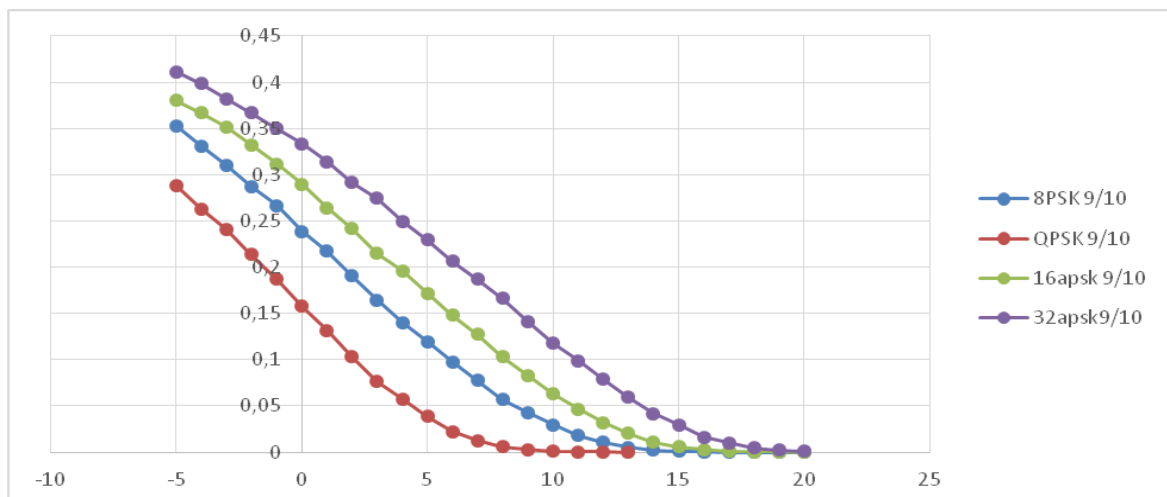
Зависимость BER от SNR после декодирования LDPC

Анализ рисунка 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.



Зависимость BER после демодулирования от SNR для одного вида модуляции с разными скоростями кодирования

Из рисунка видно, что все графики наложены друг на друга, отсюда следуют, что BER после демодулирования не зависит от скорости кодирования.



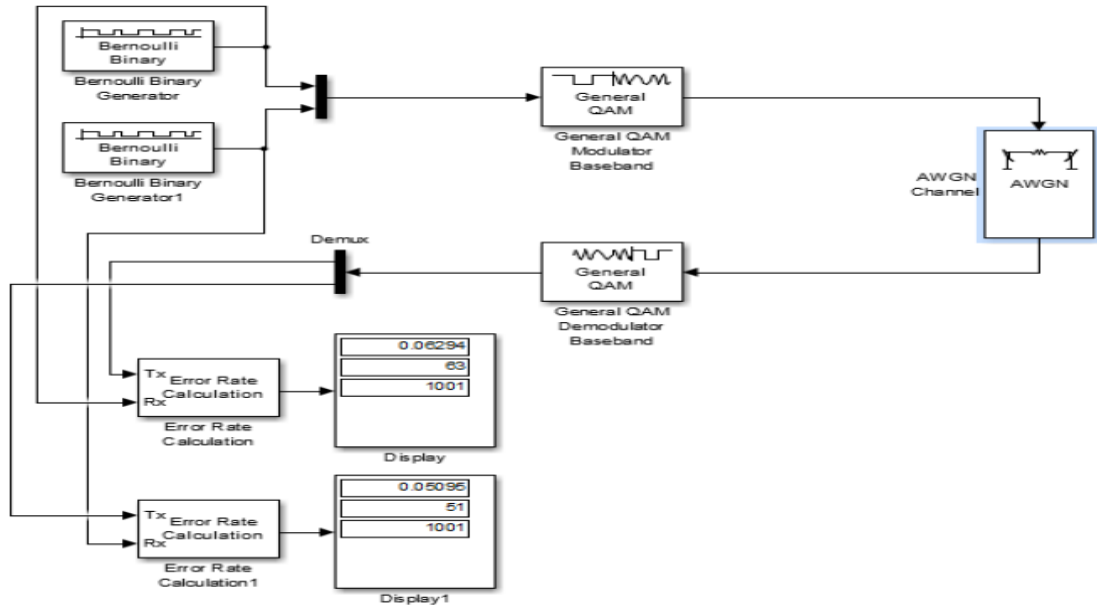
Зависимость BER от SNR после демодулирования для разных видов модуляции с одинаковой скоростью кодирования

Из рисунка 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)

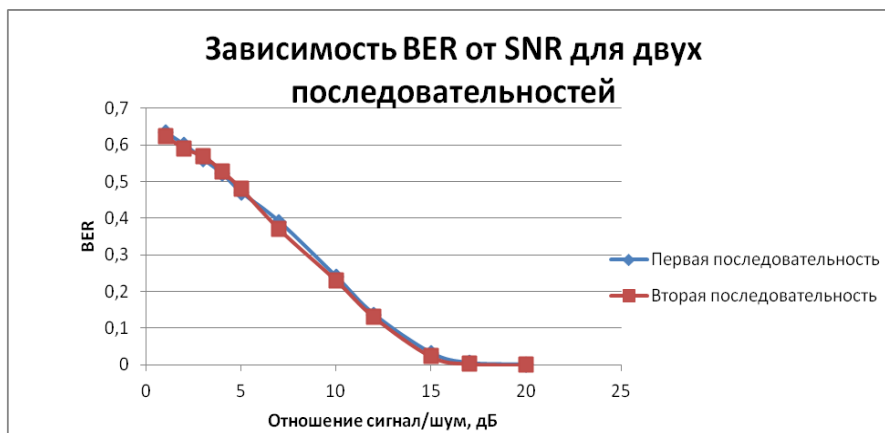
Командная линия построена на основе режима многочастотного доступа с разделением по времени (MF-TDMA) (линия вверх). На рисунке представлена схема аппаратно-программного комплекса в среде разработки Simulink для стандарта MF-TDMA.



### 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.



Зависимость BER от SNR для двух последовательностей

## 15. ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ (ЗАДАНИЕ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ)

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.

Исходные данные заданы в таблице вариантов 5.2:

Цифровая информация передается двоичным кодом. Виды передаваемой цифровой информации:

ДК - данные компьютерного обмена;

ЦТЛФ - цифровая телефония;

ЦТВ - сообщения цифрового ТВ;

ЦЗВ - сообщения цифрового звукового вещания.

Канал связи - канал с постоянными параметрами и аддитивным белым гауссовым шумом.

Отношение с/ш на входе демодулятора  $h_0 = E_0 / N_0$ .

Методы модуляции: ФМ-2, ФМ-4.

Прием - когерентный.

Производительность источника  $R_{ист}$  (бит / с).

Полоса пропускания канала  $F_k$  (кГц).

Вероятность ошибки бита в сообщениях, отдаваемых получателю, не более  $p$ .

Допустимая сложность декодера СК (показатель сложности решетки кода) - не более  $W$ .

Необходимо:

Выбрать и обосновать выбор корректирующего кода для проектируемой ТКС, обеспечивающего требуемую вероятность ошибки бита  $p$  в сообщениях, отдаваемых получателю, при условии выполнения следующих ограничений:

Полоса частот кодированного сигнала не должна превышать полосу пропускания канала  $F_k$ .

При использовании сверточных кодов показатель сложности решетки кода должен быть не более величины  $W$ .

Разработать и дать подробное описание структурной и функциональных схем кодера и декодера выбранного кода и обосновать их параметры.

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:

Задание и исходные данные.

Описание структурной схемы проектируемой телекоммуникационной системы с указанием мест включения кодера помехоустойчивого кода, модулятора, демодулятора и декодера с подробными пояснениями выполняемых ими функций.

Классификация корректирующих кодов по структуре. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков помехоустойчивых блочных и сверточных кодов. Обоснование применения в проекте сверточных кодов.

Классификация и сравнительный анализ алгоритмов декодирования сверточных кодов. Обоснование выбора алгоритма Витерби для декодирования СК.

Расчет ширины спектра цифрового сигнала с заданным видом модуляции.

Расчет ширины спектра кодированного цифрового сигнала с заданным видом модуляции в зависимости от скорости кода.

Определение допустимой скорости кода  $R_{КОД}^*$  из условия неперевышения полосой частот кодированного сигнала полосы пропускания канала (ограничение 1.1).

Определение перечня кодов со скоростями, превышающими допустимую скорость  $R_{КОД}^*$ , которые могут быть использованы для решения поставленной задачи.

Выбор СК из этого перечня, обеспечивающего заданную вероятность ошибки бита (условие 1) и удовлетворяющего требованию ограничения по сложности декодера (ограничение 1.2).

Проверочный расчет зависимости вероятности ошибки на выходе декодера выбранного СК.

Разработка и описание структурных и функциональных схем кодера и декодера выбранного СК.

Заключение с подведением итогов выполненной работы.

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

$$R_{КОД}^* > R_{КОД} = \frac{F_{(ФМ)}}{F_K} . \quad (5.1)$$

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 слоэ/сно- сти 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.

Отношение с/ш  $h_0 = 4$  дБ.

Метод модуляции: ФМ-4.

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  $W = 150$ .

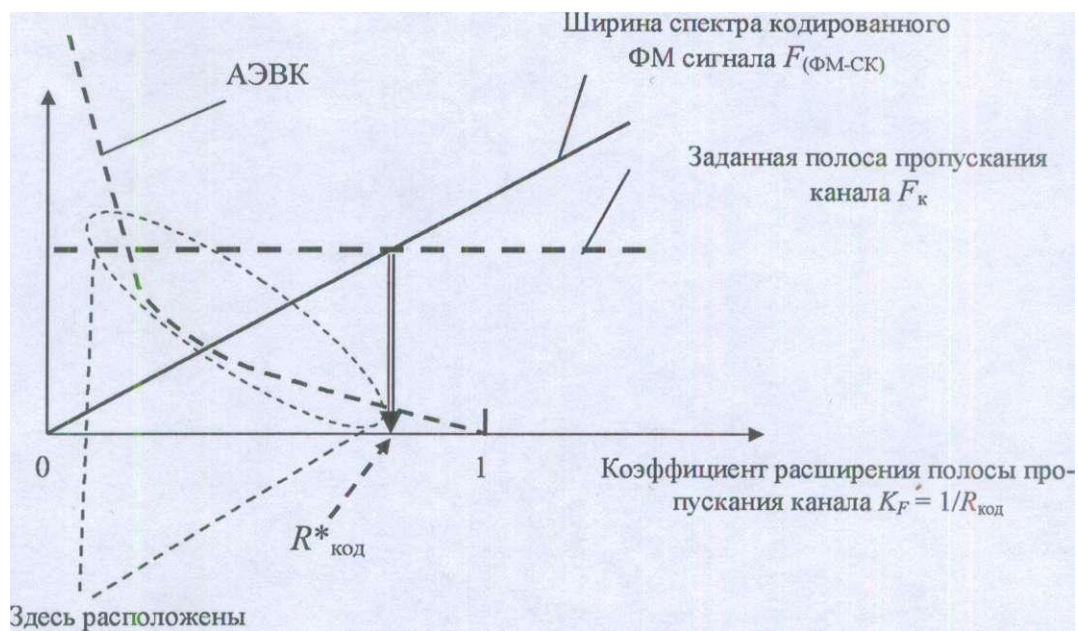


Рис. 14.1. К процедуре оптимизации кода

Расчет полосы пропускания канала связи, необходимой для передачи цифровой информации с заданной скоростью методом ФМ-4, производим по формуле  $F_{(ФМ-4)} = [R_{ист}(1 - \alpha)]/2$ , где  $\alpha$  - коэффициент ската спектра. Задаваясь значением  $\alpha = 0,4$ , получаем  $F_{(ФМ-4)} = [R_{ист}(1 - \alpha)]/2 = [64(1 - 0,4)]/2 = 44,8$  кГц.

В соответствии с формулой (5.1) определяем предельное значение скорости С К

$$R_{КОД}^* > \frac{F_{ФМ-СК}}{F_K} = \frac{44,8}{100} = 0,448.$$

3. По таблицам СК отбираем коды, удовлетворяющие требованию по скорости. Данные об этих кодах сведены в таб. 14.1.

Таблица 14.1-Характеристики СК для выбора кода

Скорость кода $R_{КОД}$	Порождающие многочлены	ДКО $v$	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  $h^2 = 4$  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 14.2. Исходные данные для выполнения СР

<p>Номер варианта для выполнения СР должен соответствовать номеру фамилии студента в журнале академической группы</p>
---



Номер варианта	Вид перед, информ.	Отношение С/Ш на входе $h^2, \text{дБ}$	Метод на модуль.	Производительность источника $R_{ист}, \text{кбит/с}$	Полоса пропуск, канала ФК, кГц	Вер. ошибки бита $p$	Сложность декодера $W$
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 14.3. Параметры проектируемой ТКС

Номер варианта для выполнения индивидуальной работы должен соответствовать номеру фамилии студента в журнале академической группы

Ном ер варианта	Вид перед. Информации	Отнош ение С/Ш нб 2, дБ	Метод модуляции	Произ в. источника Рист, кбит/с	Пропус кная способность канала кГц	Вер. Ошибки бита	Сло жн. 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 1.1.

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.

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:

Блочные коды:

Линейные коды общего вида;

1.1.2 Коды Хемминга;

Линейные циклические коды:

Коды CRC;

Коды BCH;

Коды коррекции ошибок Рида — Соломона;

Сверточные коды;

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:

Алгебраические методы декодирования;

Вероятностные методы декодирования:

Алгоритм последовательного декодирования;

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:

$$F_{\Phi M-2} = \frac{R \cdot (1 + \alpha)}{2} = \frac{2400 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0.4)}{2} = 1.68 \text{ МГц}$$

Расчет ширины спектра кодированного цифрового сигнала с заданным видом модуляции в зависимости от скорости кода:

$$R_{\text{код}^*} = \frac{F_{\Phi M-2}}{F_{\kappa}} = \frac{1680 \cdot 10^3}{7000 \cdot 10^3} = 0.24$$

Следовательно скорость кода должна быть не менее 0.24. Полученный результат позволяет сформировать список подходящих сверточных кодов в виде представленном в таблице 14.3.

Таблица 14.4. Перечень подходящих сверточных кодов

Скорость кода $R_{\text{код}}$	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
В силу того, критерием оптимальности проектируемой 64 ГКС является простота используемого кодера/декодера был выбран код /133,171/ с длиной кодового ограничения 7,	133,171	6	128	6,99
1/2	247,371	7	256	6,99

который при скорости кода 0.5 обеспечивает АЭВК = 6.99 дБ.

Изложенное позволяет рассчитать ширину спектра кодированного цифрового сигнала:

$$F_{\Phi M-2+CK} = \frac{F_{\Phi M-2}}{R_{\text{код}}} = \frac{1680 \cdot 10^3}{0.5} = 3.36 \text{ МГц}$$

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.

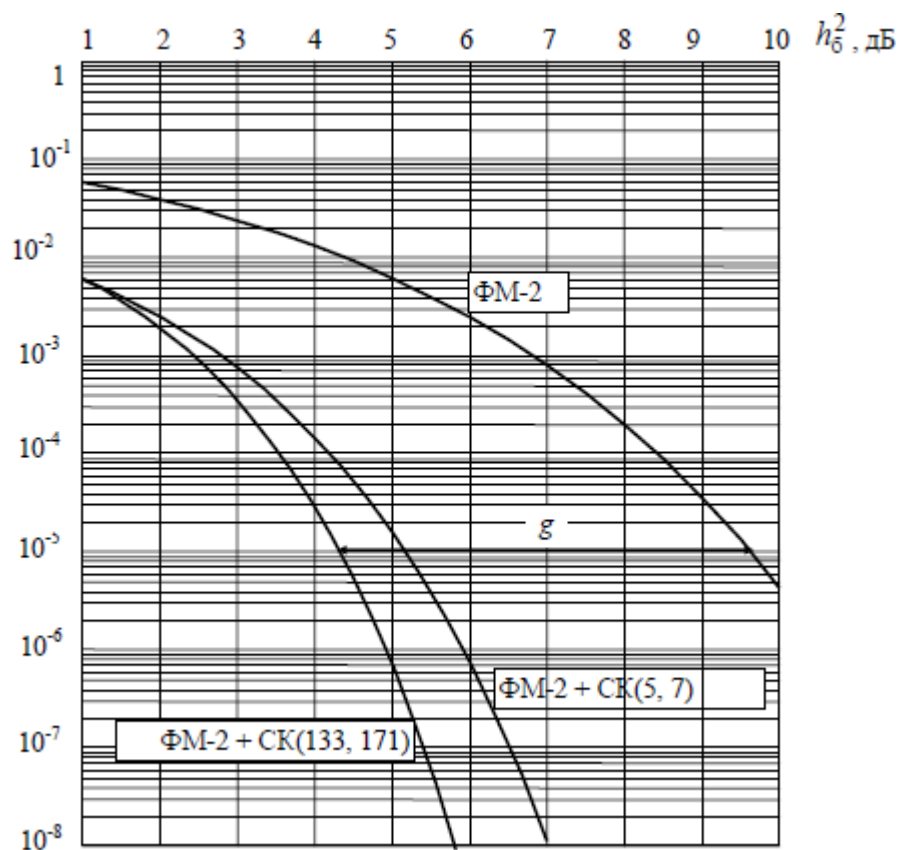


Рис. 14.2. Помехоустойчивость декодирования сверточных кодов

Проверочный расчет вероятности ошибки на выходе декодера:

$$Q = 0.65 \cdot \exp(-0.44 \cdot (z + 0.75)^2) = 0.65 \cdot$$

$$\cdot \exp(-0.44 \cdot (5.01 + 0.75)^2) = 2.972 \cdot 10^{-7}$$

$$P_o = w_{df} \cdot Q \cdot (\sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{код} \cdot h_o^2}) = 36 \cdot 2.972 \cdot 10^{-7} \cdot (\sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0.5 \cdot 5}) = 7.565 \cdot 10^{-5}$$

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:

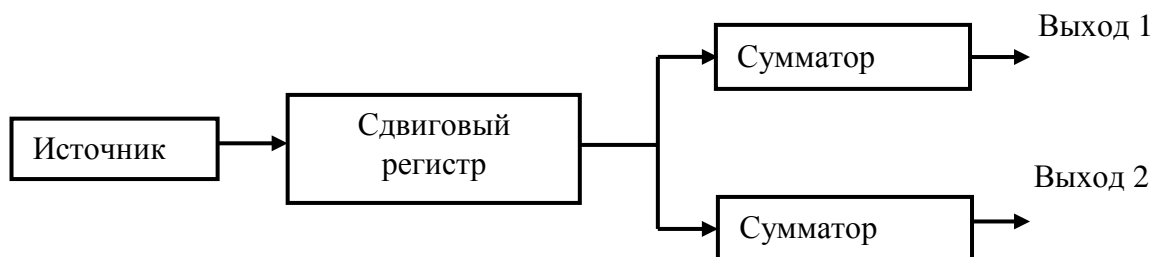


Рис. 14.3. Структурная схема сверточного кодера

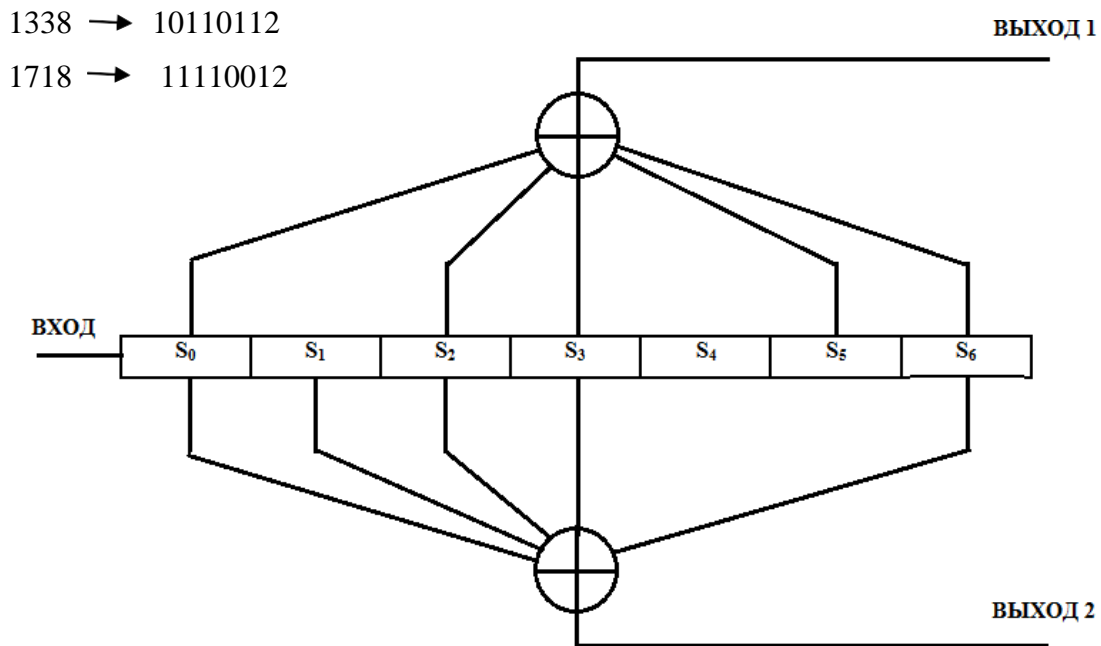


Рис. 14.4. Функциональная схема сверточного кодера 133,171

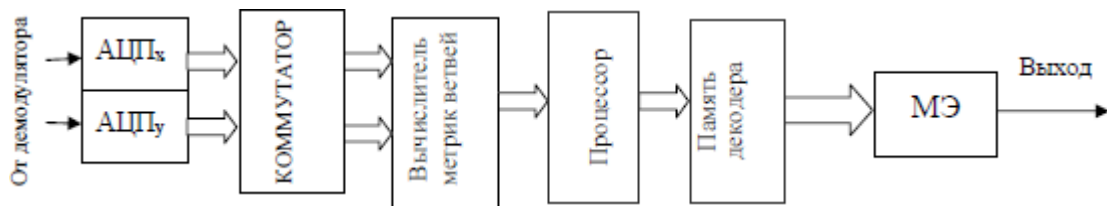


Рис. 14.5. Структурная схема декодера Витерби

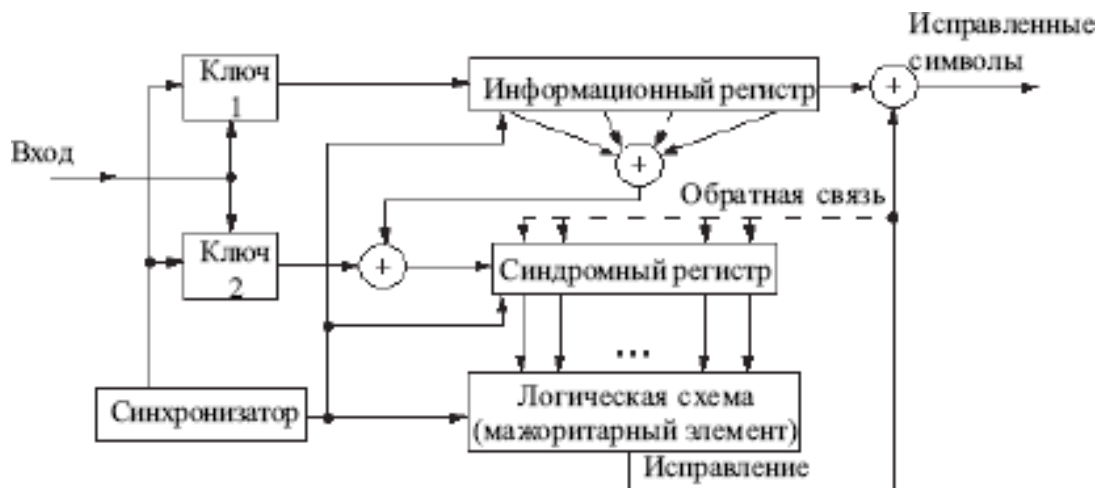


Рис. 14.6. Функциональная схема декодера Витерби

В результате выполнения данной индивидуальной работы было сделано следующее:  
 Спроектирована телекоммуникационная система с использованием сверточного кодера;  
 Рассчитаны и оптимизированы параметры сверточного кода используемого в ТКС в целях повышения ее эффективности и помехоустойчивости;

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 5.5.

Таблица 5.5. Параметры проектируемой ТКС

Ном ер варианта	Ви д перед. инф-ии	Отн ошение С/Ш дБ	Метод модуляции	Произв . источника Рист, кбит/с	Пропуск ная способность канала кГц	Вер. ошибки бита р	Слож н. декодера W
16	ДК	7,0	ФМ-4	56	90	10-6	150
3	ЦЗ В	6,0	ФМ-2	256	800	10-5	170
8	ДК	6,0	ФМ-4	32	50	10-6	200

Структурная схема проектируемой телекоммуникационной системы

Структурная схема проектируемой телекоммуникационной системы представлена на рисунке 14.2.

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 Лемпел-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:

Алгебраические методы декодирования;

Вероятностные методы декодирования;

Алгоритм последовательного декодирования;

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

Вар  
иант

Расчеты

$$16 \quad F_{\Phi M4} = \frac{R_{\text{ист}} \cdot (1 + \alpha)}{2} = \frac{56 \cdot (1 + 0,4)}{2} = 39,2 \text{ кГц}$$

$$3 \quad F_{\Phi M4} = \frac{R_{\text{ист}} \cdot (1 + \alpha)}{2} = \frac{256 \cdot (1 + 0,4)}{2} = 179,2 \text{ кГц}$$

$$8 \quad F_{\Phi M4} = \frac{R_{\text{ист}} \cdot (1 + \alpha)}{2} = \frac{32 \cdot (1 + 0,4)}{2} = 22,4 \text{ кГц}$$

Определение допустимой скорости кода из условия неперевышения полосой частот кодированного сигнала полосы пропускания канала

Вариант

Расчеты

$$16 \quad R_{\text{код}^*} = \frac{F_{\Phi M4}}{F_K} = 0,436$$

$$3 \quad R_{\text{код}^*} = \frac{F_{\Phi M4}}{F_K} = 0,224$$

$$8 \quad R_{\text{код}^*} = \frac{F_{\Phi M4}}{F_K} = 0,448$$

Определение кода

Полученный результат позволяет сформировать список подходящих сверточных кодов в виде, представленном в таблице 14.6.

Таблица 14.6. Характеристики СК для выбора кода

Скорость кода $R_{\text{код}}$	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

Вар  
иант

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  $\frac{1}{2}$  и сложностью решетки  $W$  не более 200

Произведен выбор СК из перечня, обеспечивающего заданную вероятность ошибки бита и удовлетворяющего требованию ограничения по сложности декодера.

Вар  
иант

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

Вар  
иант

Расчеты

$$16 \quad F_{ФМ4+СК} = \frac{F_{ФМ4}}{R_{код}} = \frac{39,2}{0,5} = 78,4 \text{ кГц}$$

$$3 \quad F_{ФМ2+СК} = \frac{F_{ФМ2}}{R_{код}} = \frac{179,2}{0,5} = 358,4 \text{ кГц}$$

$$8 \quad F_{ФМ4+СК} = \frac{F_{ФМ4}}{R_{код}} = \frac{22,4}{0,5} = 44,8 \text{ кГц}$$

Рисунок 5.7 позволяет сделать вывод о том, что применение выбранного кода обеспечивает выполнение поставленной задачи, так как

Вариант	Отношение С/Ш нб 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

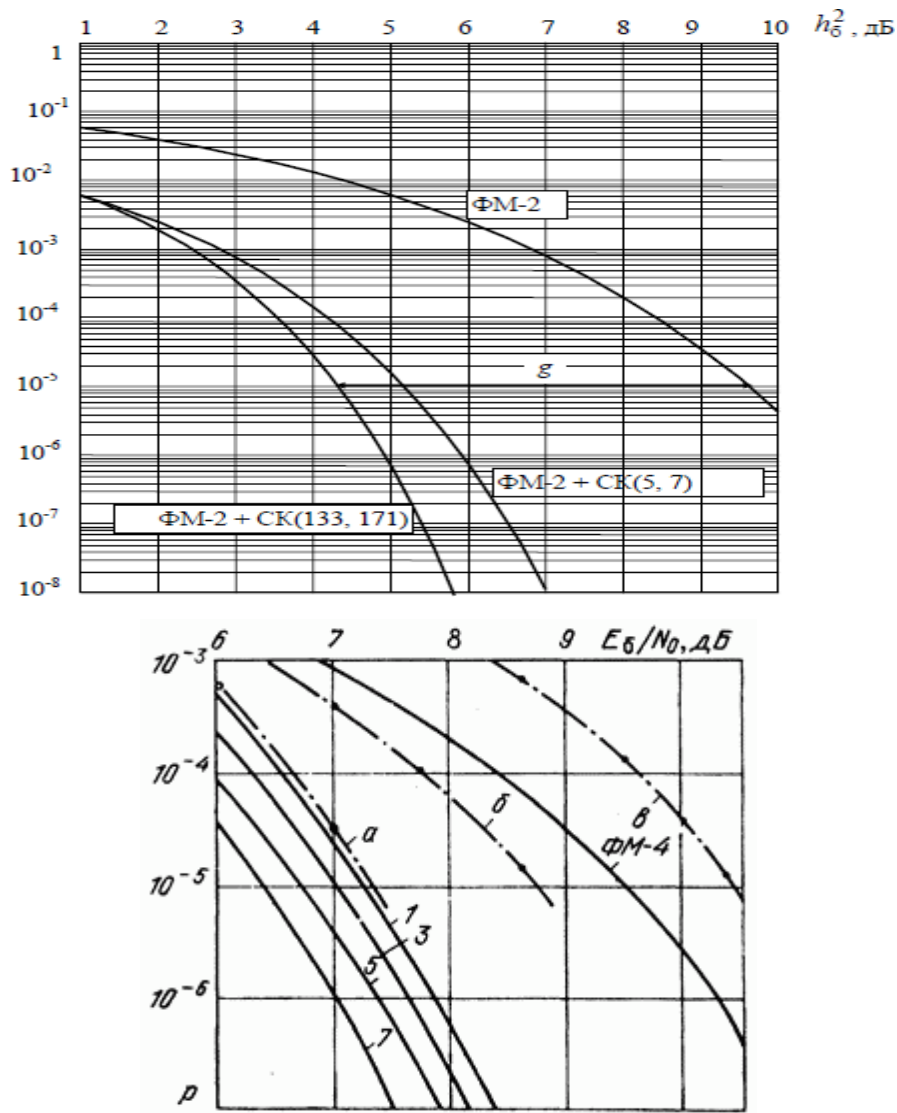


Рис. 14.7. Помехоустойчивость декодирования сверточных кодов

Проверочный расчет зависимости вероятности ошибки на выходе декодера

В результате получим (примерно для заданной вероятности ошибки бита):

Вариант	Расчеты
16	$Q = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{5,01 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{5,01^2}{2}\right) = 4,45 \cdot 10^{-5}$ $p_d = w_{df} \cdot Q \cdot \sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{kod} \cdot h_b} = 36 \cdot 4,45 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 7} = 4,2 \cdot 10^{-3}$
3	$Q = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{4^2}{2}\right) = 3,3 \cdot 10^{-5}$ $p_d = w_{df} \cdot Q \cdot \sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{kod} \cdot h_b} = 36 \cdot 3,3 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 6} = 9,2 \cdot 10^{-3}$
8	$Q = \frac{1}{x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) = \frac{1}{5,01 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{5,01^2}{2}\right) = 4,45 \cdot 10^{-5}$

$$p_d = w_{df} \cdot Q \cdot \sqrt{2 \cdot d_f \cdot R_{kod} \cdot h_b} = 36 \cdot 4.45 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 0.5 \cdot 6} = 4.2 \cdot 10^{-3}$$

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).

1338 = 10110112; 1718 = 11110012

Функциональная и структура схема кодера/декодера может быть представлена в следующем виде:

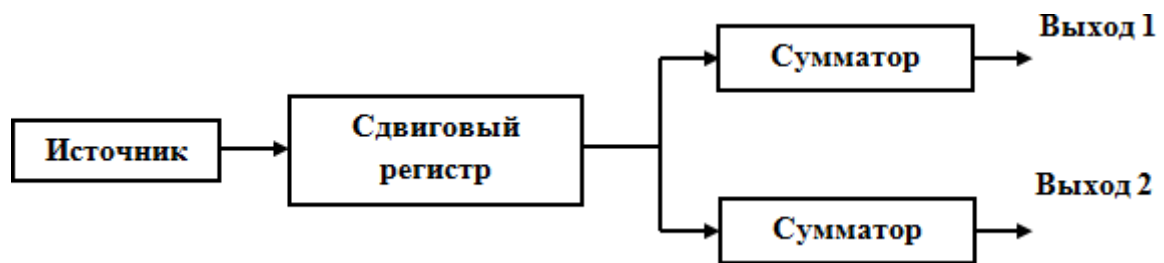


Рис. 14.8. Структурная схема сверточного кодера

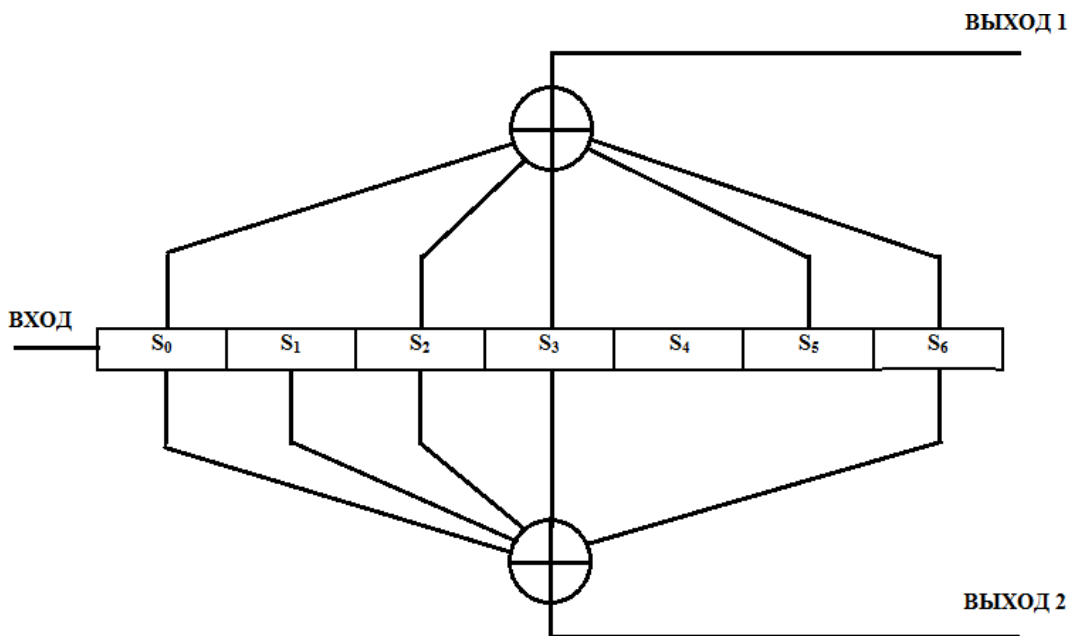


Рис. 14.9. Функциональная схема сверточного кодера 133,171

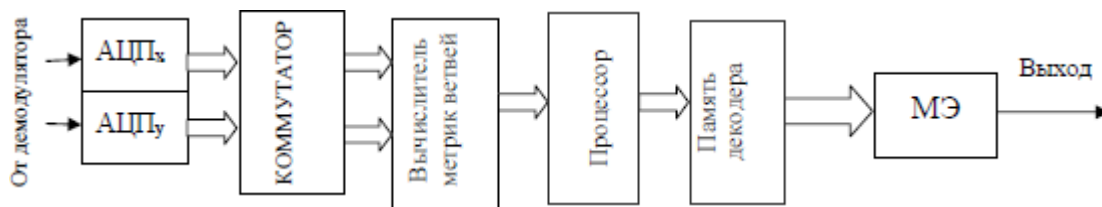


Рис. 14.10. Структурная схема декодера Витерби

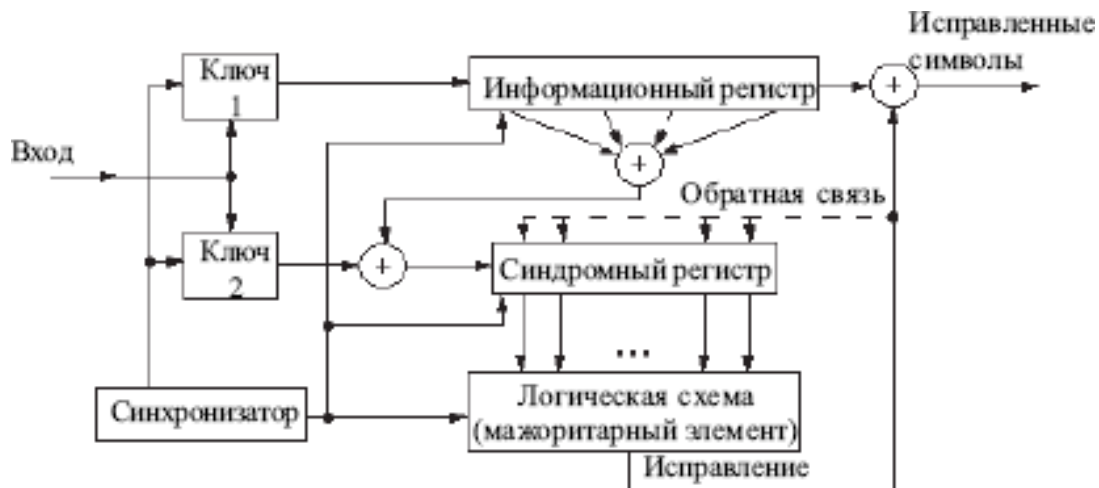


Рис. 14.11. Функциональная схема декодера Витерби

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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном учебном пособии впервые рассмотрены основные виды модуляции, кодирования и сигнально-кодовые конструкции современных модемов и кодеков перспективных стандартов телекоммуникационных систем - CDMA, IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.4 (ZigBee), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.16 (WiMAX), IEEE 802.20 (LTE), DVB-T, DVB-S и DVB-S2, DVB-C и DVB-C2, DVB-H и DVB-H2.

В учебном пособии рассмотрена теория и практика моделирования модемов сотовой связи FSK, MSK GMSK и модемы спутниковых систем связи M-QAM, M-PSK. Для анализа использовано программное обеспечение NI LabVIEW. Показана возможность создания созвездий различных видов модуляции, спектры сигналов с использованием различных фильтров, получены глазковые диаграммы и фазовые зависимости от отношения отношения сигнал/шум. Для каждого вида модуляции проведен численный анализ вероятности символьной ошибки от отношения сигнал/шум.

Рассмотрены вопросы пропускной способности канала связи, рассмотрены методы кодирования источника (Шеннона-Фано, алгоритмы сжатия Лемпеля - Зива, вейвлет-фрактальное сжатие). Проведены численные оценки коэффициентов сжатия, полученные с использованием современного программного обеспечения.

Проведено имитационное моделирование и исследование помехоустойчивых кодов Хемминга, БЧХ (Боуза-Чоудхури-Хоквенгема), Рида-Соломона на базе MATLAB 2015 Simulink, исследовано сверточные кодирование и декодирование. Проведено моделирование декодирования сверточных кодов по методу Витерби с использованием ПО MATLAB. Исследование турбокодирования, рассмотрена обобщенная схема турбокодера с параллельным каскадированием, сверточные турбокоды, декодирование турбокодов. Характеристики помехоустойчивости сверточных турбокодов исследованы с использованием ПО MATLAB 2015 Simulink. Впервые использовано ПО NI LabVIEW для исследования низкоплотностных кодов - разработан программный комплекс для визуализации и исследования LDPC-кодов. Проведена оценка помехоустойчивости LDPC-кодов в зависимости от отношения сигнал/шум и параметров кода.

Рассмотрены сигнально-кодовые конструкции на основе Треллис кодовой модуляции (TCM) и их анализ с использованием MATLAB. Исследование сигнально-кодовой конструкции на базе системы с ортогональным частотным мультиплексированием и пространственно-временным кодированием OFDM - MIMO с использованием NI LabVIEW.

Проведено имитационное моделирование на базе MATLAB 2015b 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 каналов 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.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Банкет В.Л. Помехоустойчивое кодирование в телекоммуникационных системах: учебн. пособие. - Одесса: ОНАС им А.С. Попова, 2011. - 104 с.
2. Зюко А.Г., Фалько А.И., Панфилов И.П., Банкет В.Л., Иващенко П.В. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. М.: Радио и связь. 1985.
3. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учеб. пособие / В. А. Варгаузин, И. А. Цикин. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 352 с.
4. Банкет В.Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. - Одесса: Фешкс, 2009. - 180 с.
5. Мелихов С.В. Аналоговое и цифровое радиовещание: Учебное пособие. Издание второе, исправленное. - Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 233 с.
6. Голиков А.М., Уваровский В.Д. Исследование многоуровневых методов модуляции сигналов, используемых в космических системах связи, на базе аппаратуры и ПО labVIEW 2010. Методические указания по лабораторным работам – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2011. – 50 с.
7. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 432 с..
8. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.
9. Теория и техника передачи информации : учебное пособие /Ю. П. Акулиничев, А. С. Бернгардт. — Томск: Эль Контент, 2012. — 210 с.
10. Скляр Б. Цифровая связь. — М.: Издательский дом Вильямс. 2003 — 1104с
11. Феер К.: Беспроводная цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. - 520 с.
12. Крейнделин В.Б., Колесников А.В. Оценивание параметров канала в системах связи с ортогональным частотным мультиплексированием. Учебное пособие / МТУСИ.-М., 2010. -29 с.
13. Д. Ватолин, М. Смирнов «Методы сжатия данных: Сжатие изображений»  
// [http://www.compression.ru/book/part2/part2\\_3.htm](http://www.compression.ru/book/part2/part2_3.htm)
14. С. Уэлстид. “Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии”. Москва. “Издательство ТРИУМФ” 2003. 360 .
15. <https://sites.google.com/site/szatieinformacii/lekcii/tema13>
16. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) Москва: техносфера, 2012. – 1008 с.

17. LabVIEW. Справочник по функциям. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:[http://chaos.sgu.ru/library/programms/progr/labVIEW/LabVIEW\\_suranov.pdf](http://chaos.sgu.ru/library/programms/progr/labVIEW/LabVIEW_suranov.pdf)
18. 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.
19. Серов А. В. Эфирное цифровое телевидение DVB-T/H. - БХВ-Петербург, 2010 – 465 с.
- 20 . Стандарт DVB-H. Система мобильного ТВ вещания. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/tech.php?id=dvvh>
21. [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)
22. J. H. Yuen, et. al. Modulation and Coding for Satellite and Space Communications. Proc. IEEE, vol. 78., n. 7, July, 1990, pp. 1250-1265.
23. Forney G. Concatenated Codes. Cambridge, Massachusetts: M. I. T. Press, 1966.