

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**А.М. ГОЛИКОВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ  
СТАНДАРТА IEEE 802.16 (WiMAX) НА БАЗЕ ПО MATLAB**

**Учебно-методическое пособие по лабораторной работе**

**Томск 2019**

**Голиков, А. М. Исследование модели системы мобильной связи стандарта IEEE 802.16 (WiMAX) на базе MATLAB: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Томск: ТУСУР, 2019. — 39 с.**

В лабораторной работе проводится исследование системы мобильной связи, построенной по стандарту IEEE 802.16 (WiMAX) на основе разработки программы для моделирования такой системы в среде MATLAB. Лабораторная работа предназначен для направления подготовки магистров 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" по магистерским программам подготовки: "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Оптические системы связи и обработки информации", "Инфокоммуникационные системы беспроводного широкополосного доступа", "Защищенные системы связи", для направления подготовки магистров 11.04.01 "Радиотехника" по магистерской программе подготовки: "Радиотехнические системы и комплексы", "Радиоэлектронные устройства передачи информации", "Системы и устройства передачи, приема и обработки сигналов", "Видеоинформационные технологии и цифровое телевидение" и специалитета 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" специализации "Радиолокационные системы и комплексы", "Радиоэлектронные системы передачи информации", "Радиоэлектронные системы космических комплексов", а также бакалавриата направления 11.03.01 "Радиотехника" (Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов), бакалавриата 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи (Системы мобильной связи, Защищенные системы и сети связи, Системы радиосвязи и радиодоступа, Оптические системы и сети связи) и может быть полезна аспирантам.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1 ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
2.1 Стандарты IEEE 802.16. Форум WiMAX.....	5
2.2. Архитектура сетей WiMAX IEEE 802.16. Сетевой уровень .....	8
2.3. Физический уровень WiMAX.....	10
2.3.1 Скремблирование .....	11
2.3.2 Помехоустойчивое кодирование.....	12
2.3.3 Перемежение .....	12
2.3.4 Модуляция.....	12
2.3.5 Модуляция OFDM .....	13
2.4 Защита информации .....	15
<b>3. Практическая часть. Описание экспериментальной установки и методики измерений .....</b>	<b>17</b>
<b>Заключение .....</b>	<b>39</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>39</b>

## 1 Введение

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 [1].

## 2 Теоретическая часть. Общие принципы построения сетей WiMAX

### 2.1 Стандарты IEEE 802.16. Форум WiMAX.

При переходе к созданию систем широкополосного радиодоступа с интеграцией услуг стало понятно, что основополагающие принципы, заложенные в беспроводные системы на предыдущих этапах, нуждаются в существенной корректировке. На сигнальном уровне первостепенное значение приобрело оптимальное использование спектрального ресурса радиоканала при любых соотношениях “скорость - помехоустойчивость”. На уровне протоколов стало необходимым обеспечивать заданный уровень качества обслуживания каждому абоненту сети.

Основным преимуществом сетей WiMAX по сравнению с другими технологиями, призванными решать аналогичные задачи, является относительно быстрое развертывание систем на достаточно больших территориях без проведения работ по прокладке кабеля и предоставление конечным пользователям каналов связи в единицы Мбит/с, что особенно актуально для мест с неразвитой сетевой инфраструктурой. Основным конкурентом сетей WiMAX являются системы связи четвертого поколения LTE E UTRA.

На сегодняшний день беспроводные сети городского масштаба представлены следующими стандартами:

- IEEE 802.16e-2005, 2009 (WiMAX);
- ETSI HiperMAN;
- IEEE 802.20 (WBWA).

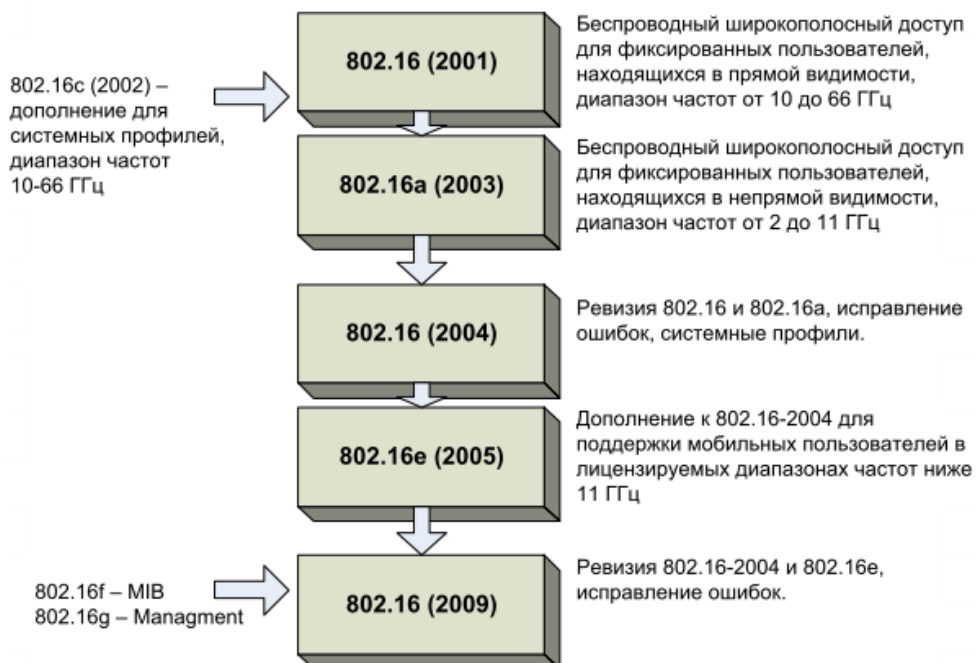


Рисунок 2.1 – Эволюция стандартов IEEE 802.16

Таблица 2.1 – Краткие характеристики стандартов, входящих в семейство IEEE 802.16

Название стандарта	IEEE 802.16	IEEE 802.16a	IEEE 802.16e
Частотный диапазон	10-66 ГГц	2-11 ГГц	2-6 ГГц
Скорость передачи информации	32-135 Мбит/с	до 75 Мбит/с	до 15 Мбит/с
Модуляция	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256, QPSK, 16QAM, 64QAM
Ширина полосы частот	20, 25 и 28 МГц	Регулируемая 1,5 – 20 МГц	Регулируемая 1,5 – 20 МГц
Радиус действия	2-5 км	7-10 км, макс. радиус 50 км	2-5 км
Условия работы	Прямая видимость	Работа на отраженных лучах	Работа на отраженных лучах

Для обеспечения работоспособности систем в диапазоне 10-66 ГГц, вследствие относительно малой длины волны, требуется наличие прямой видимости между передатчиком и приемником. В таких условиях при анализе канала связи многолучевостью среды можно пренебречь. Данные передаются на одной несущей. Ширина полосы частот одного канала составляет 20, 25 или 28 МГц, что позволяет достигать скорости передачи данных до 135 Мбит/с.

В диапазоне частот 2-11 ГГц за счет увеличения длины волны возможен сценарий взаимодействия передатчика и приемника в условиях отсутствия прямой видимости. При этом необходимо применять более сложные (по сравнению с системами, функционирующими в диапазоне частот 10-66 ГГц) методы регулировки мощности, различные способы борьбы с межсимвольной интерференцией. Для передачи данных используется одна или множество несущих (сигналы с OFDM).

Необходимо различать стандарты связи серии IEEE 802.16 (рисунок 2.1) и форум WiMAX (рисунок 2.2). Стандарты серии IEEE 802.16 — это множество стандартов, определяющих беспроводные сети городского масштаба (WMAN — Wireless Metropolitan Area Network), разработаны для обеспечения беспроводным широкополосным доступом стационарных и мобильных пользователей. Форум WiMAX является некоммерческой организацией для продвижения и сертификации устройств беспроводного широкополосного доступа, основанных на согласованном стандарте IEEE 802.16/ETSI HiperMAN. Сотрудничает с поставщиками услуг, производителями оборудования, производителями тестового оборудования, сертификационными лабораториями и поставщиками программно-аппаратных ресурсов для обеспечения соответствия ожиданиям заказчика и государственным стандартам.

Стандарты серии IEEE 802.16 определяет радиointерфейс для систем широкополосного беспроводного доступа (уровни MAC и PHY, рисунок 2.3) 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.

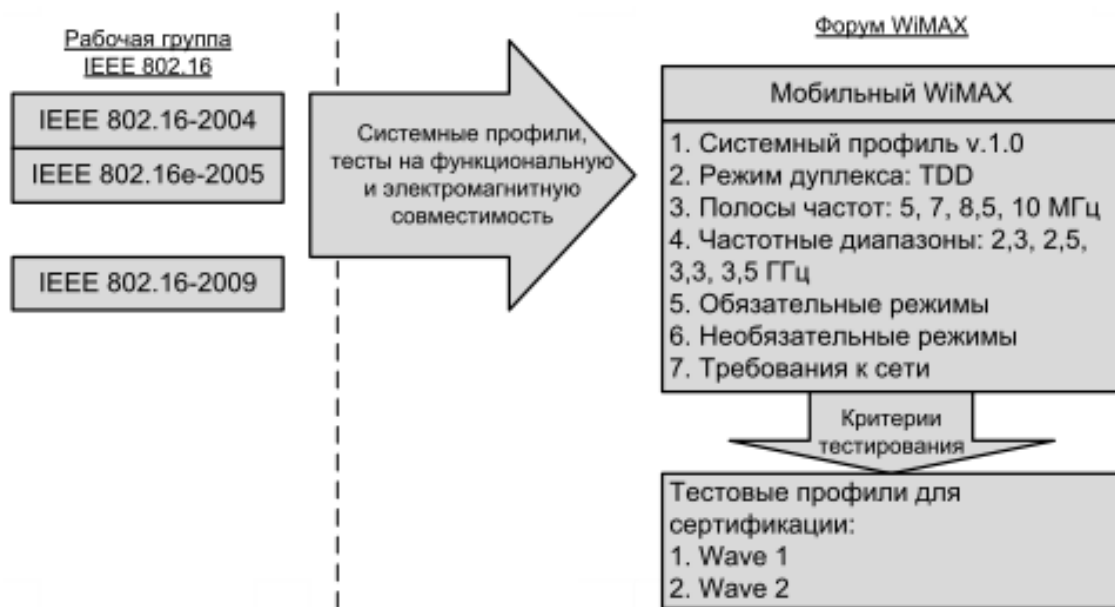


Рисунок 2.2 – Стандарты серии IEEE 802.16 и форум WiMAX

Структура стандартов IEEE 802.16 представлена на рисунке 2.3. 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.

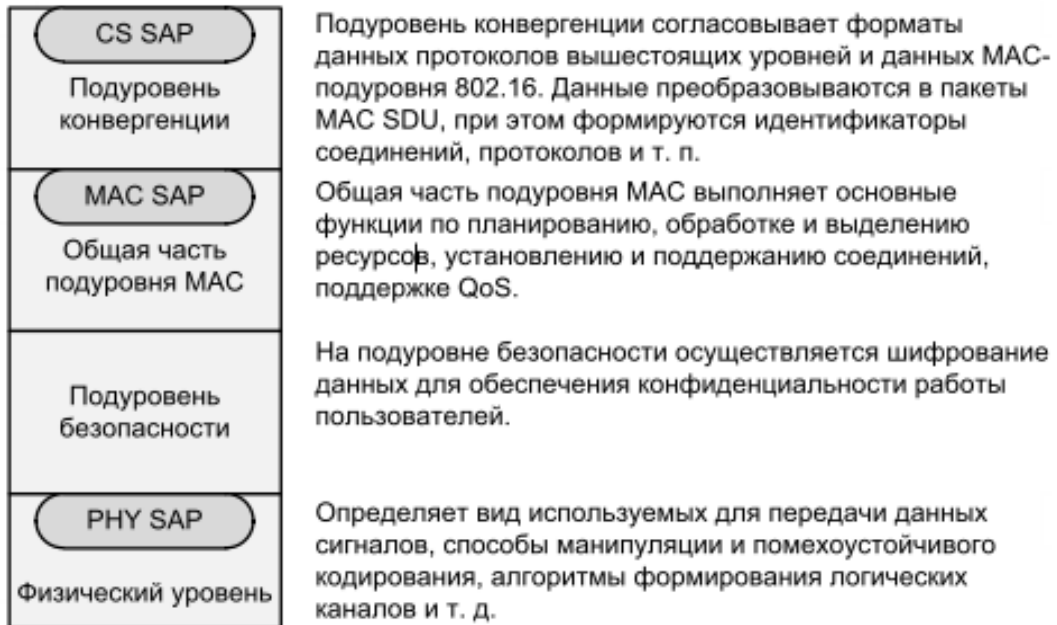


Рисунок 2.3 – Структура стандартов IEEE 802.16

## 2.2. Архитектура сетей WiMAX IEEE 802.16. Сетевой уровень

Базовая станция (БС, BS — Base Station) размещается в здании или на вышке и осуществляет связь с абонентскими станциями (АС, SS — Subscriber Station) по схеме — «точка – мультиточка» (Point to Multipoint — PMP). Возможен сеточный режим связи (Mesh — сетка связей — «точка – точка» — PTP), когда любые клиенты (АС) могут осуществлять связь между собой непосредственно, а антенные системы, как правило, являются ненаправленными. БС предоставляет соединение с основной сетью и радиоканалы к другим станциям. Радиус действия БС может достигать 30 км (в случае прямой видимости) при типовом радиусе сети 6–8 км. АС может быть радиотерминалом или повторителем, который используется для организации локального трафика. Трафик может проходить через несколько повторителей, прежде чем достигнет клиента. Антенны в этом случае являются направленными.

Канал связи предполагает наличие двух направлений передачи: восходящий канал (АС – БС, uplink) и нисходящий (БС – АС, downlink). Эти два канала используют разные неперекрывающиеся частотные диапазоны при частотном дуплексе и различные интервалы времени при временном дуплексе.

Простейший способ представления архитектуры сетей WiMAX заключается в их описании как совокупности БС, которые располагаются на крышах высотных зданий или вышках, и клиентских приемо-передатчиков (рисунок 2.4).





Рисунок 2.4 – 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 2.2 – Основные режимы для стандарта IEEE 802.16 в РФ

Диапазон частот, ГГц	Разрешенные полосы частот, МГц	Общая ширина выделенных полос, МГц	Тип беспроводного доступа
2,5	2500 – 2530 2560 – 2570 2620 – 2630 2660 – 2670 2680 – 2690	70	мобильный
3,5	3400 – 3450 3500 – 3550	100	фиксированный
5	5150 – 5350 5650 – 5725 5725 – 6425	975	фиксированный

В этих спецификациях к сетям WiMAX предъявляются такие требования, как независимость архитектуры от функций и структуры транспортной IP-сети. В то же время, должны обеспечиваться услуги, основанные на применении IP-протокола, а также мобильная телефония на основе VoIP и мультимедийные услуги. Обязательным является условие поддержки архитектурой протоколов IPv4 и IPv6. Сети WiMAX должны быть легко масштабируемыми и гибко изменяемыми и основываться на принципе декомпозиции (строиться на основе стандартных логических модулей, объединяемых через стандартные интерфейсы). Свойства масштабируемости и гибкости необходимо обеспечивать по таким эксплуатационным характеристикам, как плотность абонентов, географическая протяженность зоны покрытия, частотные диапазоны, топология сети, мобильность абонентов. Сети WiMAX должны поддерживать взаимодействие с другими беспроводными или проводными сетями. Большое значение имеет способность обеспечивать различные уровни качества обслуживания QoS.

### 2.3. Физический уровень WiMAX

На физическом уровне систем WiMAX над передаваемыми битами осуществляются следующие канальные процедуры (рисунок 2.5): скремблирование (рандомизация), помехоустойчивое кодирование, перемежение, кодирование повторением и модуляция.

Полученные модуляционные символы делятся на логические подканалы, и с использованием ОБПФ формируется отсчет передаваемого OFDMA-символа.

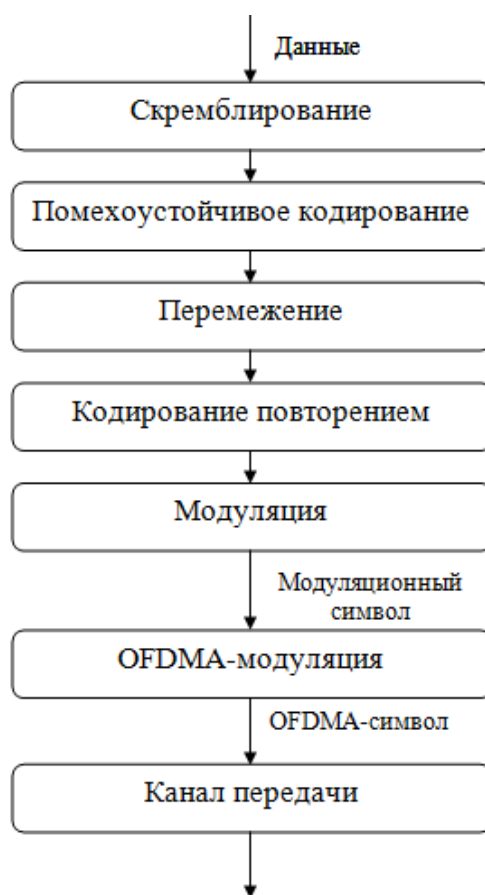


Рисунок 2.5 – Преобразования данных на физическом уровне WiMAX

На физическом уровне в стандарте IEEE 802.16-2004 определены три метода передачи данных: метод модуляции одной несущей (SC), метод ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и метод множественного доступа на основе такого мультиплексирования (OFDMA) [2].

Спецификация физического уровня WirelessMAN-OFDM является наиболее интересной с точки зрения практической реализации. Она базируется на технологии OFDM, что значительно расширяет возможности оборудования, в частности, позволяет работать на относительно высоких частотах в условиях отсутствия прямой видимости. Кроме того, в нее включена поддержка топологии «каждый с каждым» (mesh) [3], при которой абонентские устройства могут одновременно функционировать и как базовые станции, что сильно упрощает развертывание сети и помогает преодолеть проблемы прямой видимости.

### 2.3.1 Скремблирование

Скремблирование — это сложение по модулю два передаваемых битов с элементами ПСП, которую формирует генератор ПСП с задающим полиномом вида  $x^{15} + x^{14} + 1$ . Генератор ПСП инициализируется вектором 011011100010101.

Скремблирование осуществляется только над информационными битами. Причем при скремблировании каждого блока данных, подлежащих помехо-

устойчивому кодированию, сдвигающий регистр скремблера инициализируется заново. Байты данных поступают на вход скремблера начиная со старшего значащего разряда.

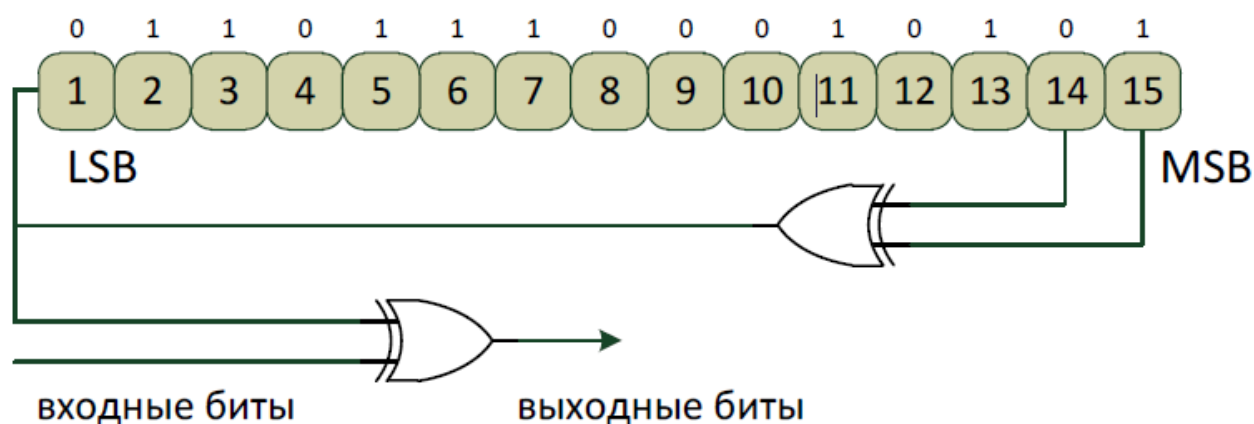


Рисунок 2.6 – Схема скремблера

### 2.3.2 Помехоустойчивое кодирование

Многочувствительное распространение радиосигнала может приводить к ослаблению и даже полному подавлению некоторых поднесущих вследствие интерференции прямого и задержанного сигналов. Для решения этой проблемы используется помехоустойчивое кодирование. В стандарте IEEE 802.16-2004 предусмотрены как традиционные технологии помехоустойчивого кодирования, так и относительно новые методы. К традиционным относится сверточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби и коды Рида-Соломона. К относительно новым — блочные и сверточные турбокоды.

### 2.3.3 Перемежевание

После осуществления скремблирования и помехоустойчивого кодирования, над битами каждого блока должно быть выполнено двухэтапное перекечение. Первый этап гарантирует, что соседние в исходной последовательности биты будут распределены не в соседние поднесущие. Второй этап обеспечивает распределение соседних битов или в наиболее, или в наименее значимые биты сигнального созвездия, что предотвратит длительные последовательности наименее надежных битов.

### 2.3.4 Модуляция

В системах беспроводного широкополосного доступа используют сигналы как двоичной (ФМ-2), так и многопозиционной (ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64 и т. п.) модуляции. Сигналы многопозиционной фазовой модуляции (МФМ) характеризуются высокой частотной эффективностью, однако при этом вследствие уменьшения евклидовых расстояний между сигнальными точками существенно снижается помехоустойчивость приема, что при фиксированной вероятности ошибки эквивалентно ухудшению энергетической эффективности. Сиг-

налы КАМ являются некоторым компромиссом, выигрывая у МФМ по энергетической эффективности, но уступая по спектральной, что может компенсироваться применением помехоустойчивого кода. По этой причине в сетях WiMAX IEEE 802.16e-2005, 2009 применяются методы модуляции ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64.

При отображении бит на сигнальную плоскость применяется манипуляционный код Грея. Соответствующие сигнальные созвездия представлены на рисунке 2.7.

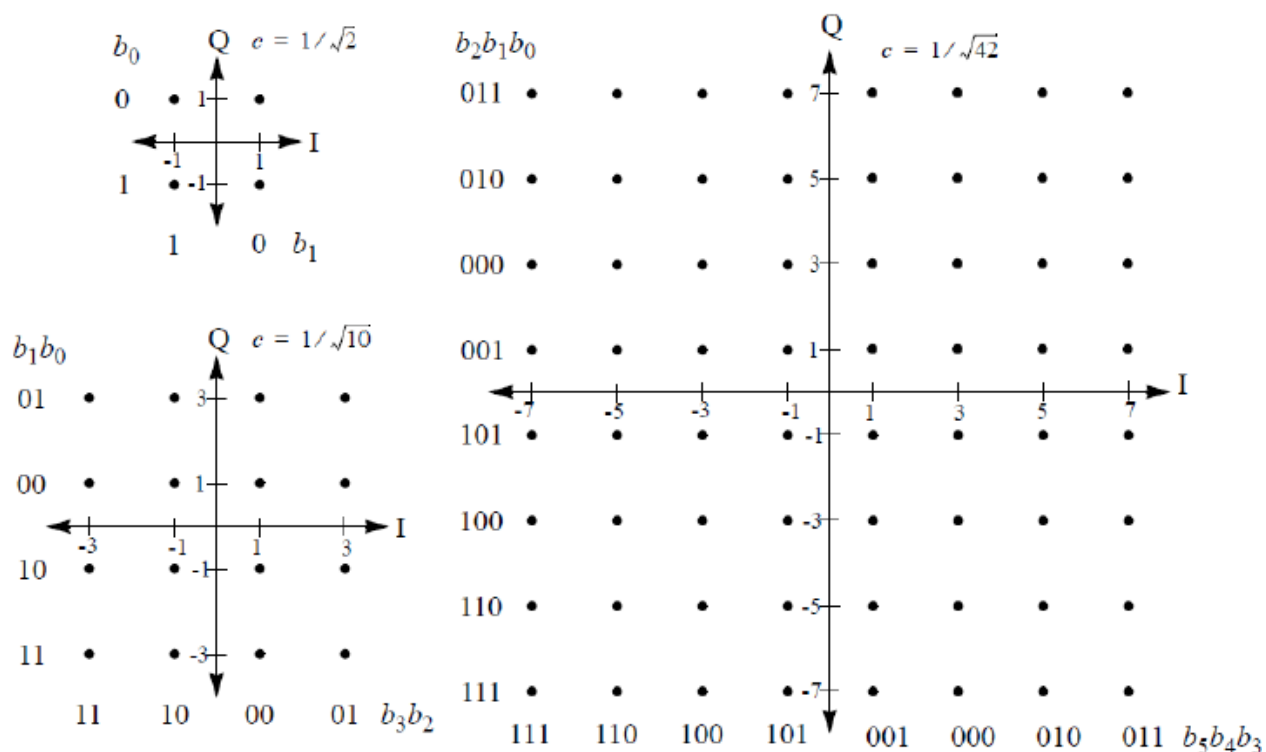


Рисунок 2.7 – Сигнальные созвездия, соответствующие методам модуляции ФМ-4, КАМ-16 и КАМ-64, IEEE 802.16e-2005

### 2.3.5 Модуляция OFDM

При формировании OFDM-сигнала [4] цифровой поток данных делится на несколько подпотоков, и каждая поднесущая связывается со своим подпотоком данных. Амплитуда и фаза поднесущей вычисляются на основе выбранной схемы модуляции. Согласно стандарту, отдельные поднесущие могут модулироваться с использованием бинарной фазовой манипуляции (BPSK), квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) или квадратурной амплитудной манипуляции (QAM) порядка 16 или 64. В передатчике амплитуда как функция фазы преобразуется в функцию от времени с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). В приемнике с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) осуществляется преобразование амплитуды сигналов как функции от времени в функцию от частоты.

Применение преобразования Фурье позволяет разделить частотный диапазон на поднесущие, спектры которых перекрываются, но остаются ортогональными. Ортогональность поднесущих означает, что каждая из них содержит целое число колебаний на период передачи символа. Как видно на рисунке 2.8, спектральная кривая любой из поднесущих имеет нулевое значение для «центральной» частоты смежной кривой. Именно эта особенность спектра поднесущих и обеспечивает отсутствие между ними интерференции.

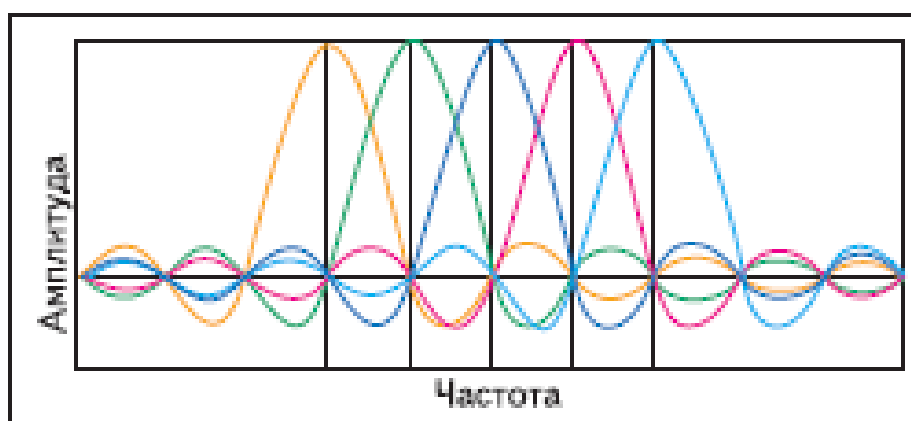


Рисунок 2.8 – Ортогональные поднесущие

Одним из главных преимуществ метода OFDM является его устойчивость к эффекту многолучевого распространения. Эффект вызывается тем, что излученный сигнал, отражаясь от препятствий, приходит к приемной антенне разными путями, вызывая межсимвольные искажения. Этот вид помех характерен для городов с разноэтажной застройкой из-за многократных отражений радиосигнала от зданий и других сооружений. Для того чтобы избежать межсимвольных искажений, перед каждым OFDM-символом вводится защитный интервал, называемый циклическим префиксом. Циклический префикс представляет собой фрагмент полезного сигнала, что гарантирует сохранение ортогональности поднесущих (но только в том случае, если отраженный сигнал при многолучевом распространении задержан не больше, чем на длительность циклического префикса). Кроме того, циклический префикс позволяет выбрать окно для преобразования Фурье в любом месте временного интервала символа (рисунок 2.9).

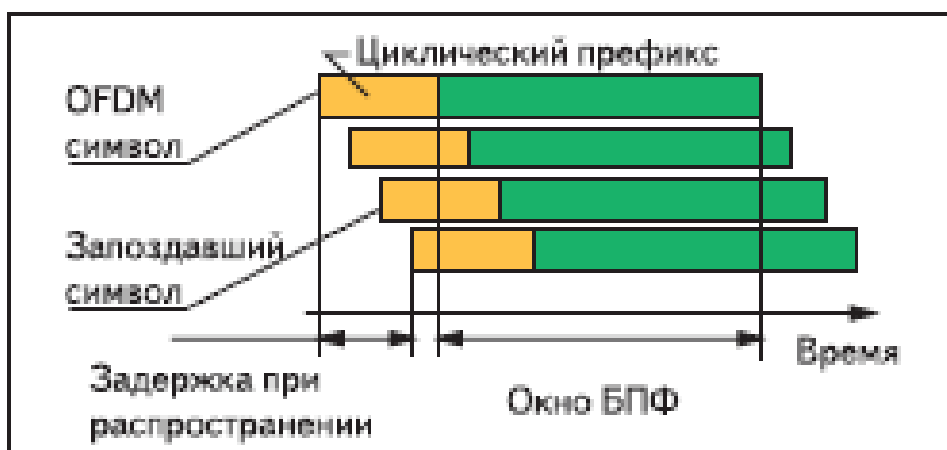


Рисунок 2.9– Обработка OFDM-символа при многолучевом распространении

## 2.4 Защита информации

В соответствии со стандартом, для предотвращения несанкционированного доступа и защиты пользовательских данных осуществляется шифрование всего передаваемого по сети трафика. Базовая станция (БС) WiMAX представляет собой модульный конструктив, в который при необходимости можно установить несколько модулей со своими типами интерфейсов, но при этом должно поддерживаться административное программное обеспечение для управления сетью. Данное программное обеспечение обеспечивает централизованное управление всей сетью. Логическое добавление в существующую сеть абонентских комплектов осуществляется также через эту административную функцию.

Абонентская станция (АС) представляет собой устройство, имеющее уникальный серийный номер, MAC-адрес, а также цифровую подпись X.509, на основании которой происходит аутентификация АС на БС. При этом, согласно стандарту, срок действительности цифровой подписи АС составляет 10 лет. После установки АС у клиента и подачи питания АС авторизуется на базовой станции, используя определенную частоту радиосигнала, после чего базовая станция, основываясь на перечисленных выше идентификационных данных, передает абоненту конфигурационный файл по TFTP-протоколу. В этом конфигурационном файле находится информация о поддиапазоне передачи (приема) данных, типе трафика и доступной полосе, расписание рассылки ключей для шифрования трафика и прочая необходимая для работы АС информация. Необходимый файл с конфигурационными данными создается автоматически, после занесения администратором системы АС в базу абонентов, с назначением последнему определенных параметров доступа.

После процедуры конфигурирования аутентификация АС на базовой станции происходит следующим образом:

1. Абонентская станция посылает запрос на авторизацию, в котором содержится сертификат X.509, описание поддерживаемых методов шифрования и дополнительная информация.

2. Базовая станция в ответ на запрос на авторизацию (в случае достоверности запроса) присылает ответ, в котором содержится ключ на аутентификацию, зашифрованный открытым ключом абонента, 4-битный ключ для определения последовательности, необходимый для определения следующего ключа на авторизацию, а также время жизни ключа.

3. В процессе работы АС через промежуток времени, определяемый администратором системы, происходит повторная авторизация и аутентификация, и в случае успешного прохождения аутентификации и авторизации поток данных не прерывается.

В стандарте используется протокол РКМ (Privacy Key Management), в соответствии с которым определено несколько видов ключей для шифрования передаваемой информации:

- Authorization Key (АК) — ключ, используемый для авторизации АК на базовой станции;
- Traffic Encryption Key (ТЕК) — ключ, используемый для криптозащиты трафика;
- Key Encryption Key (КЕК) — ключ, используемый для криптозащиты передаваемых в эфире ключей.

Согласно стандарту, в каждый момент времени используются два ключа одновременно, с перекрывающимися временами жизни. Данная мера необходима в среде с потерями пакетов (а в эфире они неизбежны) и обеспечивает бесперебойность работы сети. Имеется большое количество динамически меняющихся ключей, достаточно длинных, при этом установление безопасных соединений происходит с помощью цифровой подписи. Согласно стандарту, криптозащита выполняется в соответствии с алгоритмом 3-DES, при этом отключить шифрование нельзя. Опционально предусмотрено шифрование по более надежному алгоритму AES



### 3. Практическая часть. Описание экспериментальной установки и методики измерений

Работа выполняется с использованием симулятора физического уровня стандарта IEEE 802.16-2004 в программной среде Simulink. Для запуска программы, в командную строку MATLAB необходимо ввести "commwman80216dstbc" и нажать Enter.

Схема исследуемой системы приведена на рисунке 3.1.

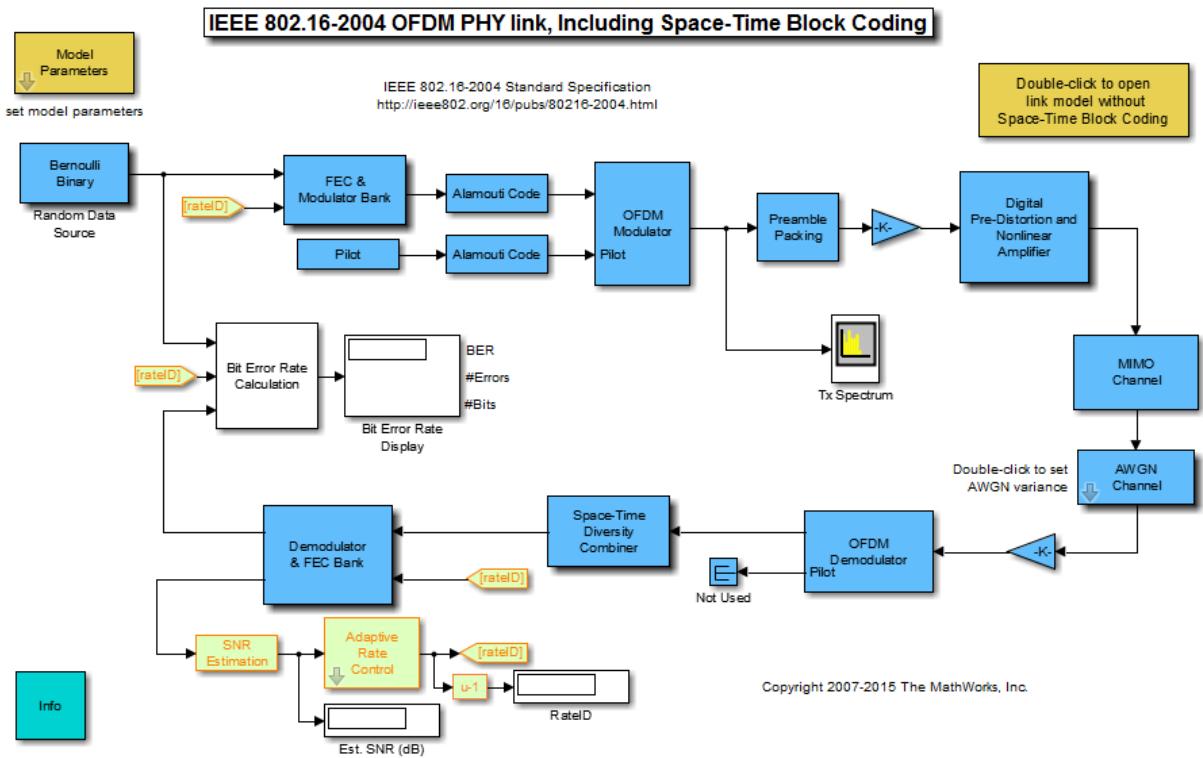


Рисунок 3.1 – Модель IEEE 802.16-2004 OFDM в MATLAB 2015b

Параметры источника случайной последовательности Bernoulli Binary

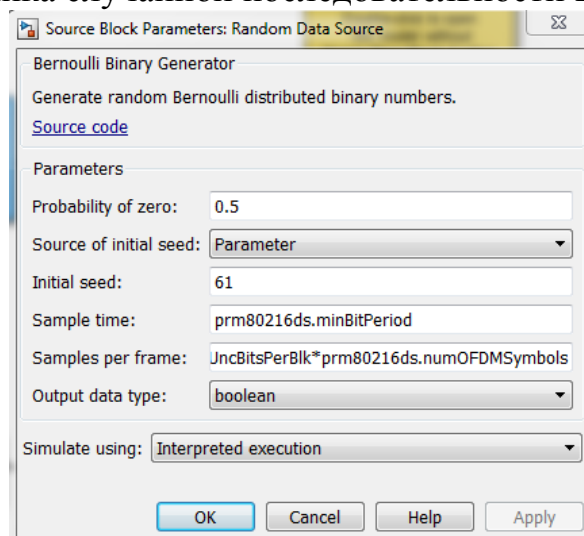


Рисунок 3.2 – Параметры блока Bernoulli Binary

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

Общие параметры модели (блок «Model Parameters», рисунок 3.3).

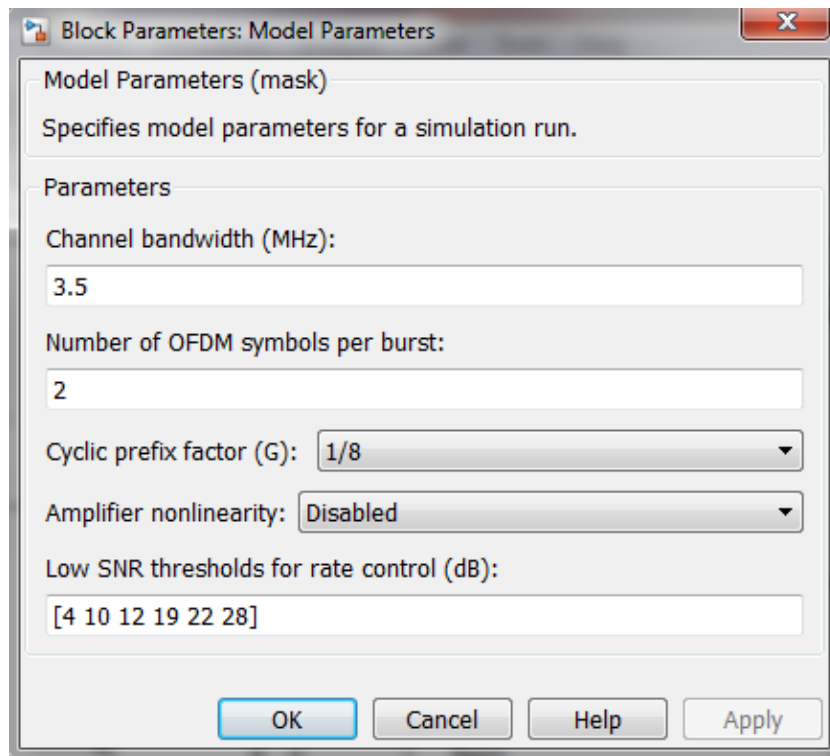


Рисунок 3.4 – Параметры системы, изменяемые в блоке «Model Parameters»

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

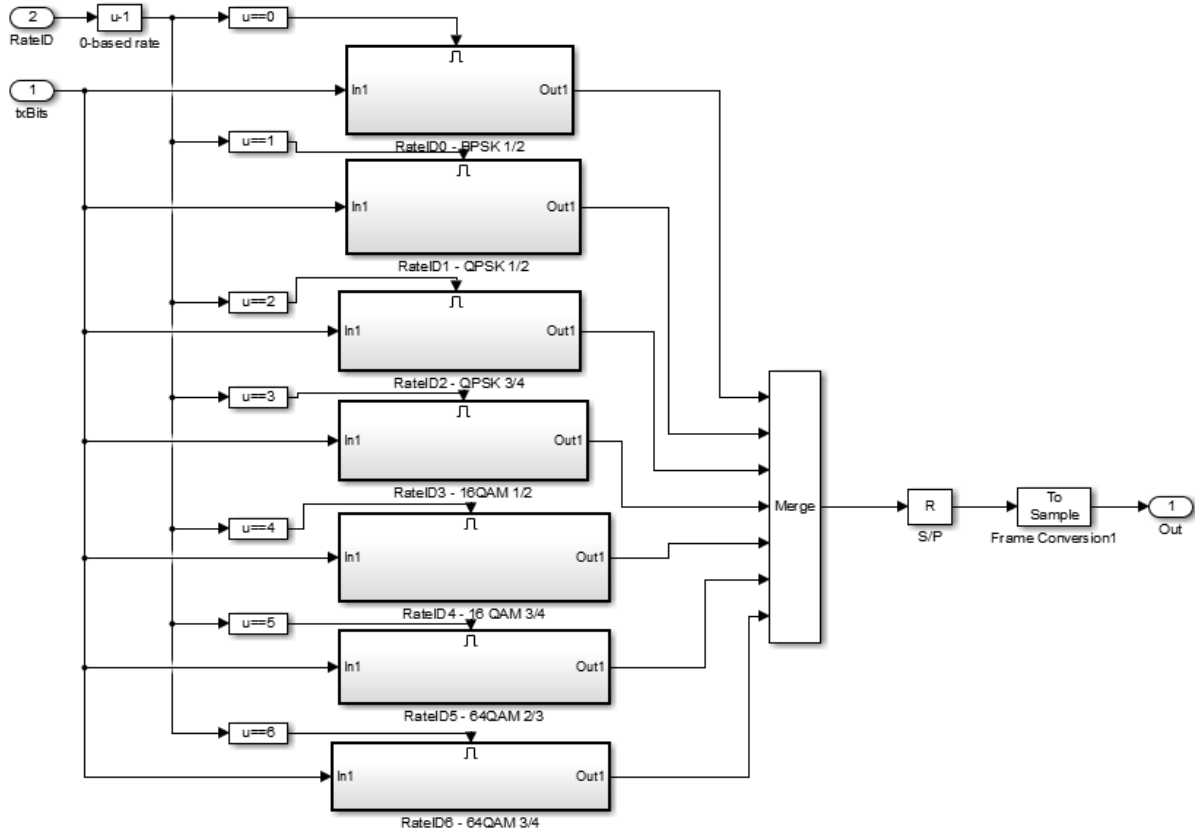


Рисунок 3.5 – Состав блока «FEC & Modulator Bank»

Рассмотрим состав каждого входящего блока:

Состав блока модулятора BPSK 1/2:

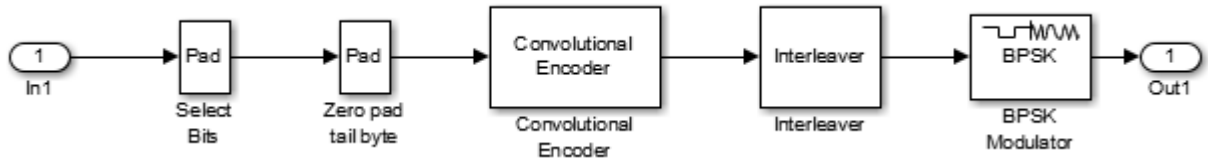


Рисунок 3.6 – Состав блока модулятора «BPSK 1/2»

Состав блока модулятора QPSK 1/2:

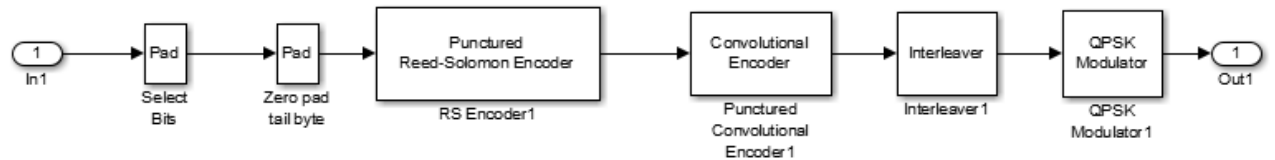


Рисунок 3.7 – Состав блока модулятора «QPSK 1/2»

Состав блока модулятора QPSK 3/4:

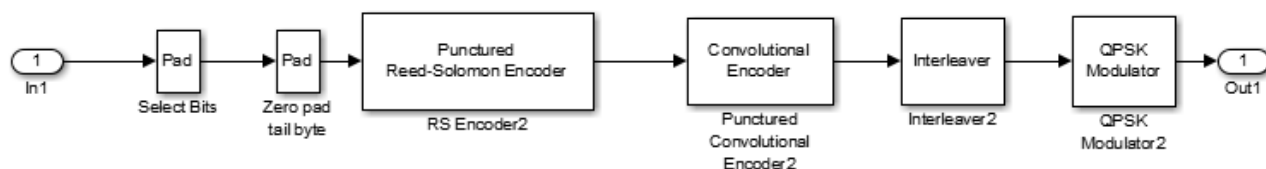


Рисунок 3.8 – Состав блока модулятора «QPSK 3/4»

Состав блока модулятора 16QAM 1/2:

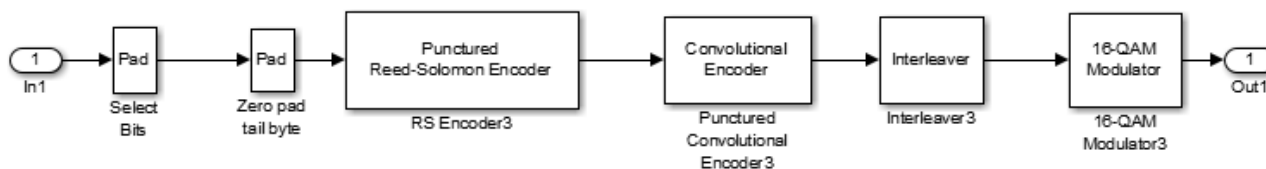


Рисунок 3.9 – Состав блока модулятора «16QAM 1/2»

Состав блока модулятора 16QAM 3/4:

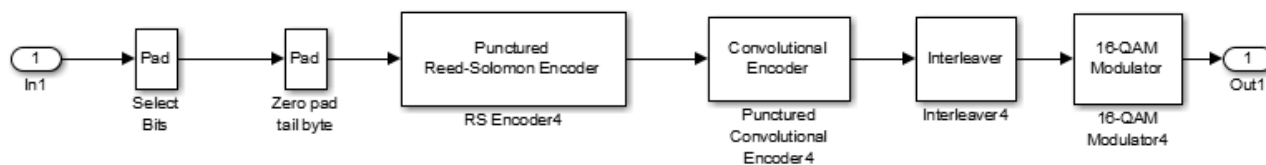


Рисунок 3.10 – Состав блока модулятора «16QAM 3/4»

Состав блока модулятора 64QAM 2/3:

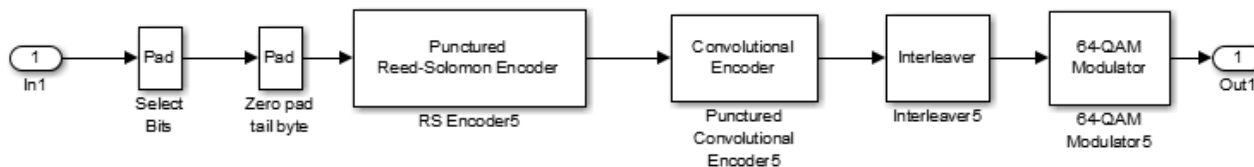


Рисунок 3.11 – Состав блока модулятора «64QAM 2/3»

Состав блока модулятора 64QAM 3/4:

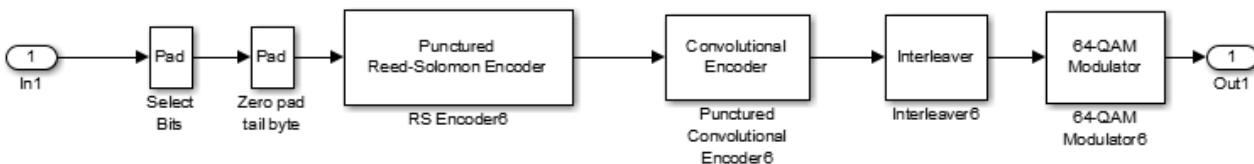


Рисунок 3.12 – Состав блока модулятора «64QAM 3/4»

Формирование сигнально-кодовых конструкций в каждом блоке происходит следующим образом: к поступающим информационным битам добавляется определяется «хвост» из нулевых бит, полученная последовательность кодируется блочным циклическим кодом Рида-Соломона. Следующий этап кодирования – сверточный код с использованием Треллис-структуры, затем, после перемежения, последовательность бит модулируется определенным образом для передачи по каналу.

В каждом из блоков на рисунках 3.6 – 3.12 используется одинаковая последовательность блоков, отличающихся своими параметрами. Например для блока «16QAM 1/2» блоки имеют параметры (рисунок 3.13 – 3.17).

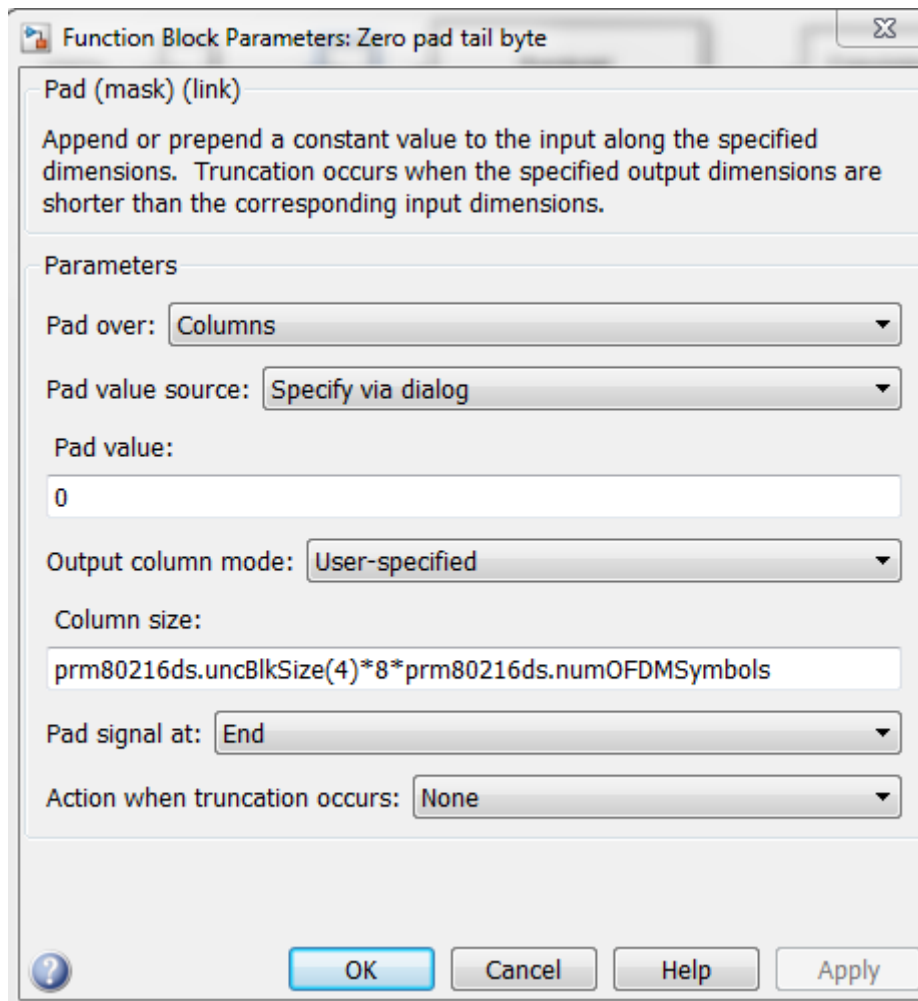


Рисунок 3.13 – Состав блока «Zero pad tail byte 16QAM 1/2»

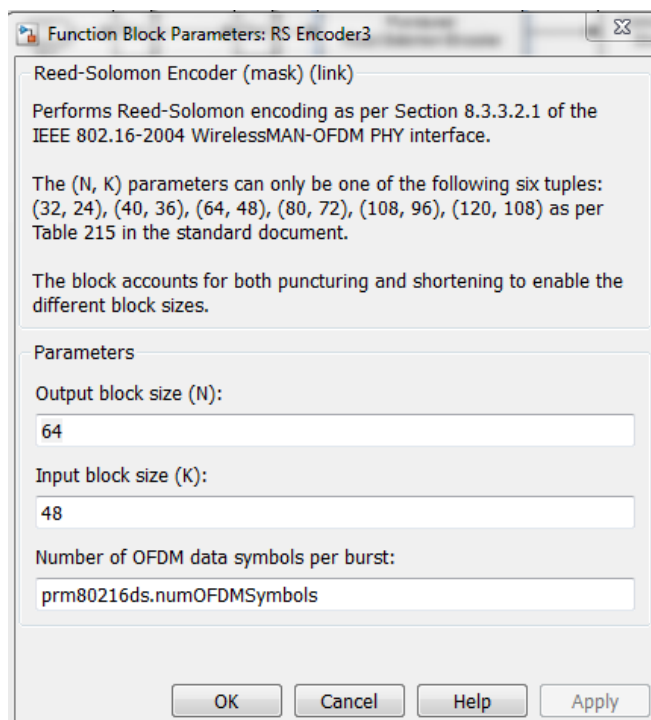


Рисунок 3.14 – Состав блока кодера Рида-Соломона «Puncured Reed-Solomon Encoder 16QAM 1/2»

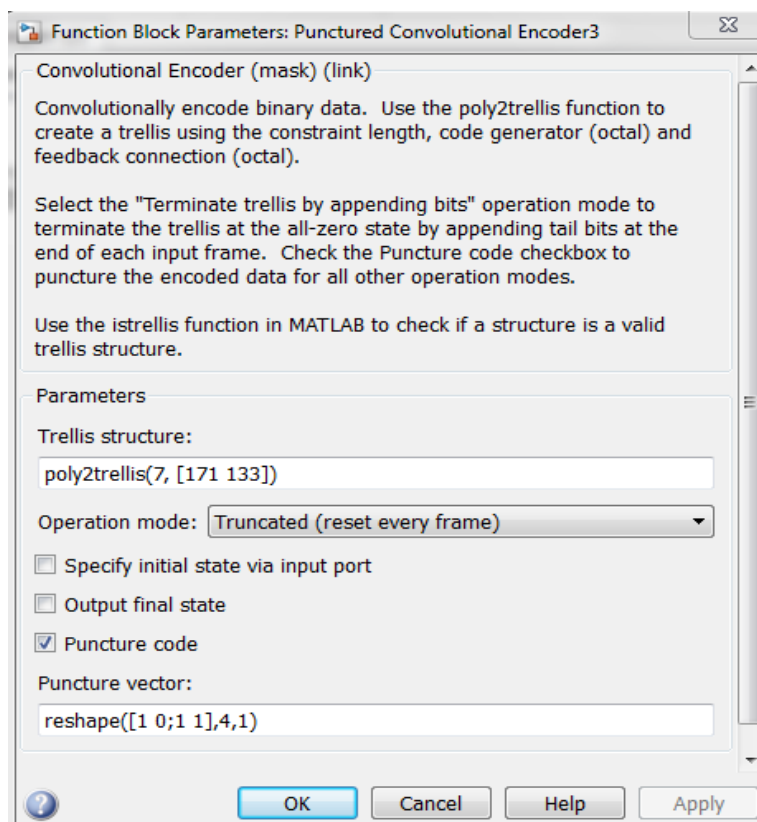


Рисунок 3.15 – Состав блока сверточного кодера «Convolutinal Encoder 16QAM 1/2»

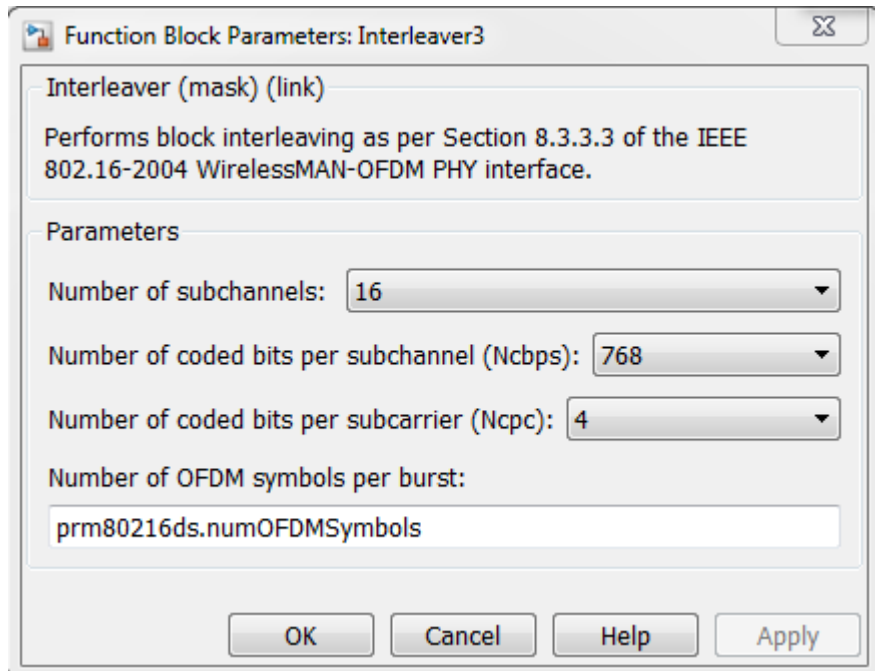


Рисунок 3.16 – Состав блока перемежителя «Interleaver 16QAM 1/2»

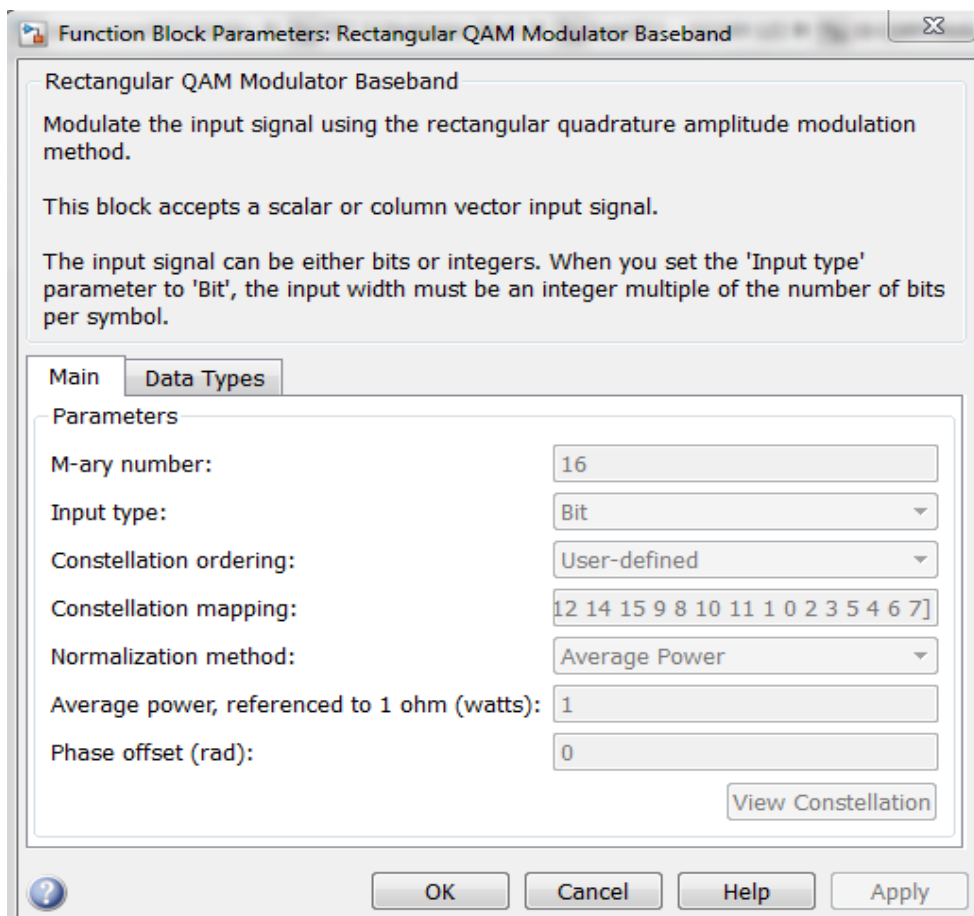


Рисунок 3.17 – Состав блока модулятора «16-QAM Modulator 16QAM 1/2»

Таблица 3.1 – Параметры кода Рида-Соломона для различных сигнально-кодовых конструкций

Вид модуляции	Общая скорость кодирования	Длина входной последовательности, бит	Длина выходной (кодированной) последовательности, бит	Параметры кода Рида-Соломона, (n, k, d)
BPSK	1/2	12	24	(12,12,0)
QPSK	1/2	24	48	(32,24,4)
QPSK	3/4	36	48	(40,36,2)
16-QAM	1/2	48	96	(64,48,8)
16-QAM	3/4	72	96	(80,70,4)
64-QAM	2/3	96	144	(108,96,6)
64-QAM	3/4	108	144	(120,108,6)

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

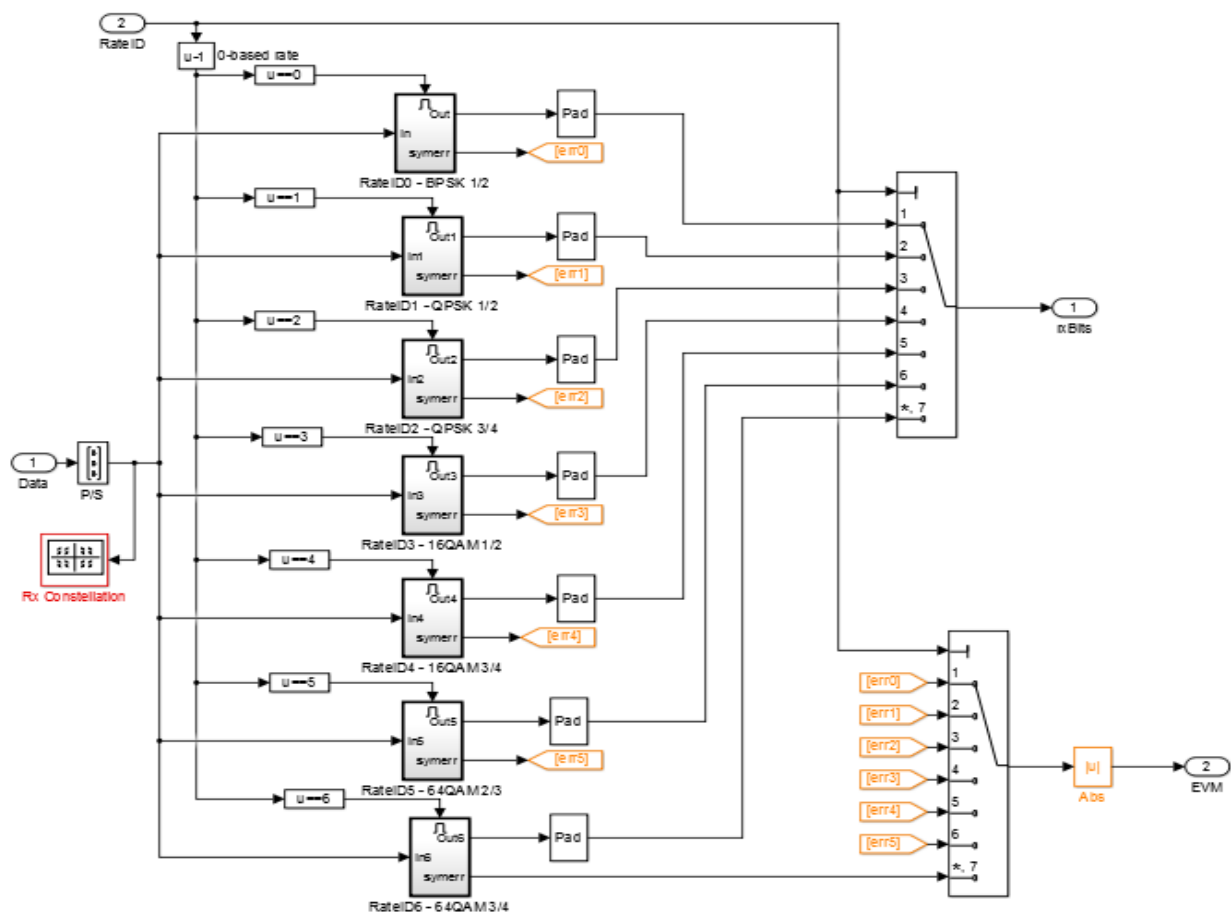


Рисунок 3.18 – Состав блока декодирования и демодуляции («Demodulator & FEC Bank»)



## Состав блока BPSK 1/2 демодулятора

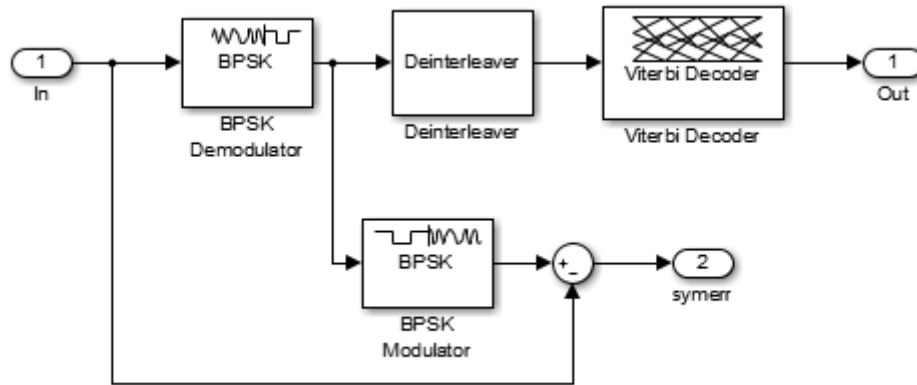


Рисунок 3.19 – Состав блока демодулятора «BPSK»

## Состав блока QPSK 1/2 демодулятора

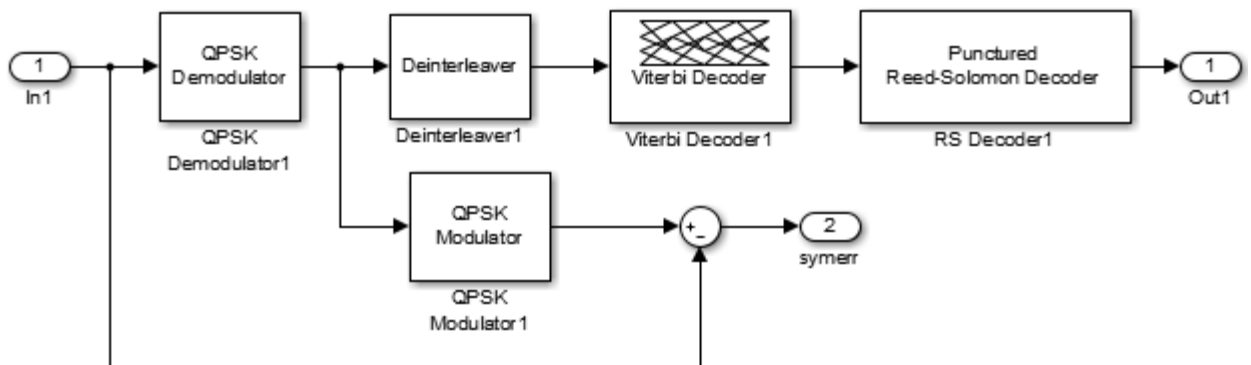


Рисунок 3.20 – Состав блока демодулятора «QPSK 1/2»

## Состав блока QPSK 3/4 демодулятора

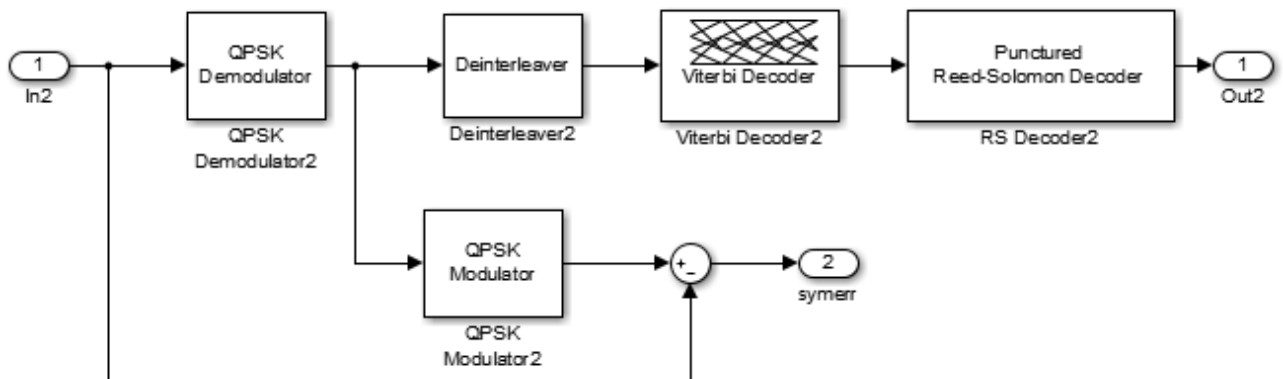


Рисунок 3.21 – Состав блока демодулятора «QPSK 3/4»

## Состав блока 16QAM 1/2 демодулятора

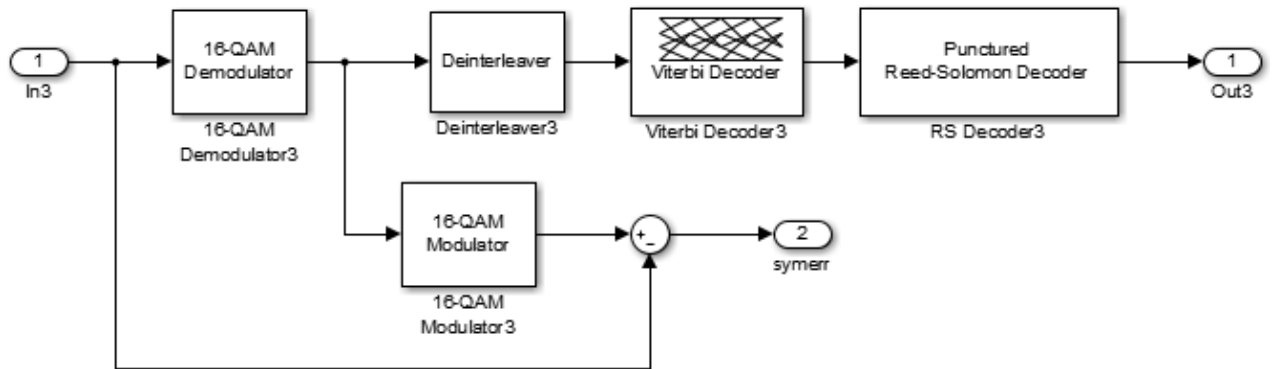


Рисунок 3.22 – Состав блока демодулятора «16QAM 1/2»

## Состав блока 16QAM 3/4 демодулятора

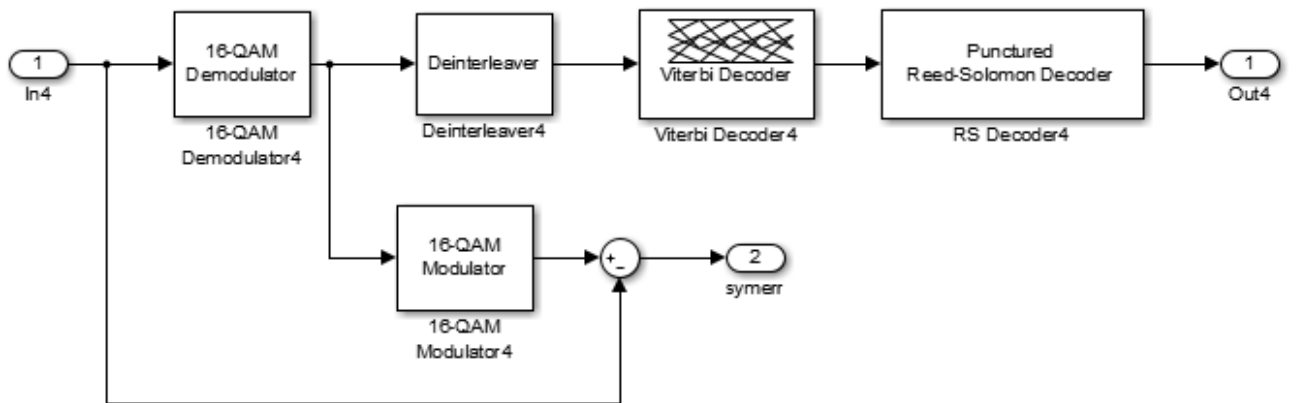


Рисунок 3.23 – Состав блока демодулятора «16QAM 3/4»

## Состав блока 64QAM 2/3 демодулятора

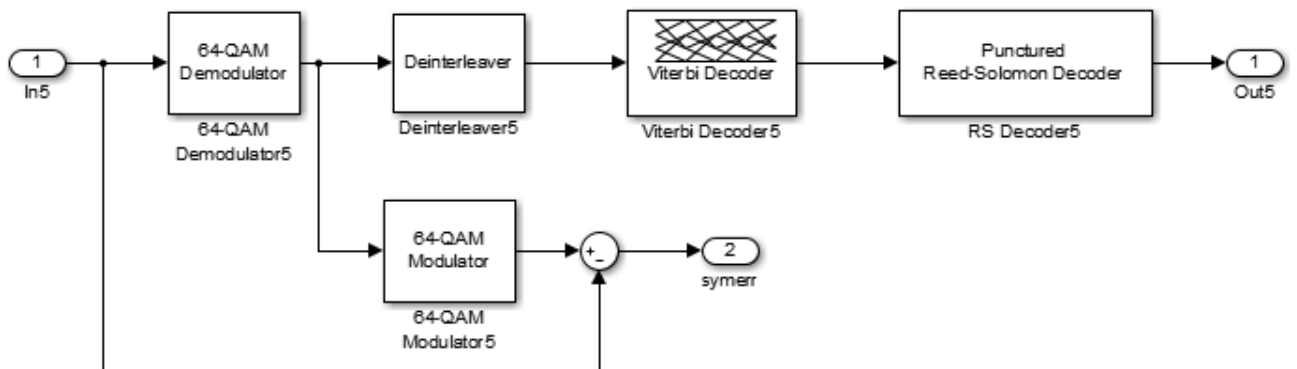


Рисунок 3.24 – Состав блока демодулятора «64QAM 2/3»

## Состав блока 64QAM 3/4 демодулятора

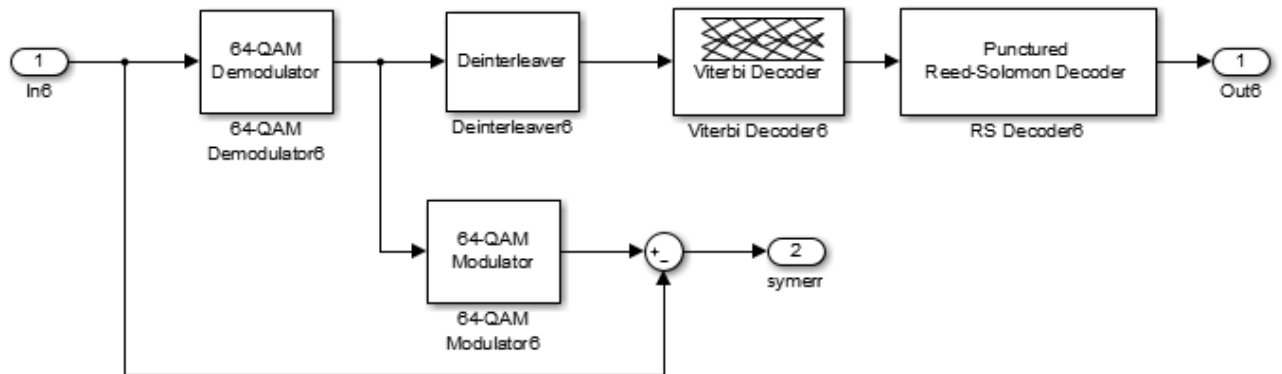


Рисунок 3.25 – Состав блока демодулятора «64QAM 3/4»

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

В каждом из блоков на рисунках 3.19 – 3.25 используется одинаковая последовательность блоков, отличающихся своими параметрами. Например для блока «16QAM 1/2» блоки имеют параметры (рисунок 3.26 – 3.29).

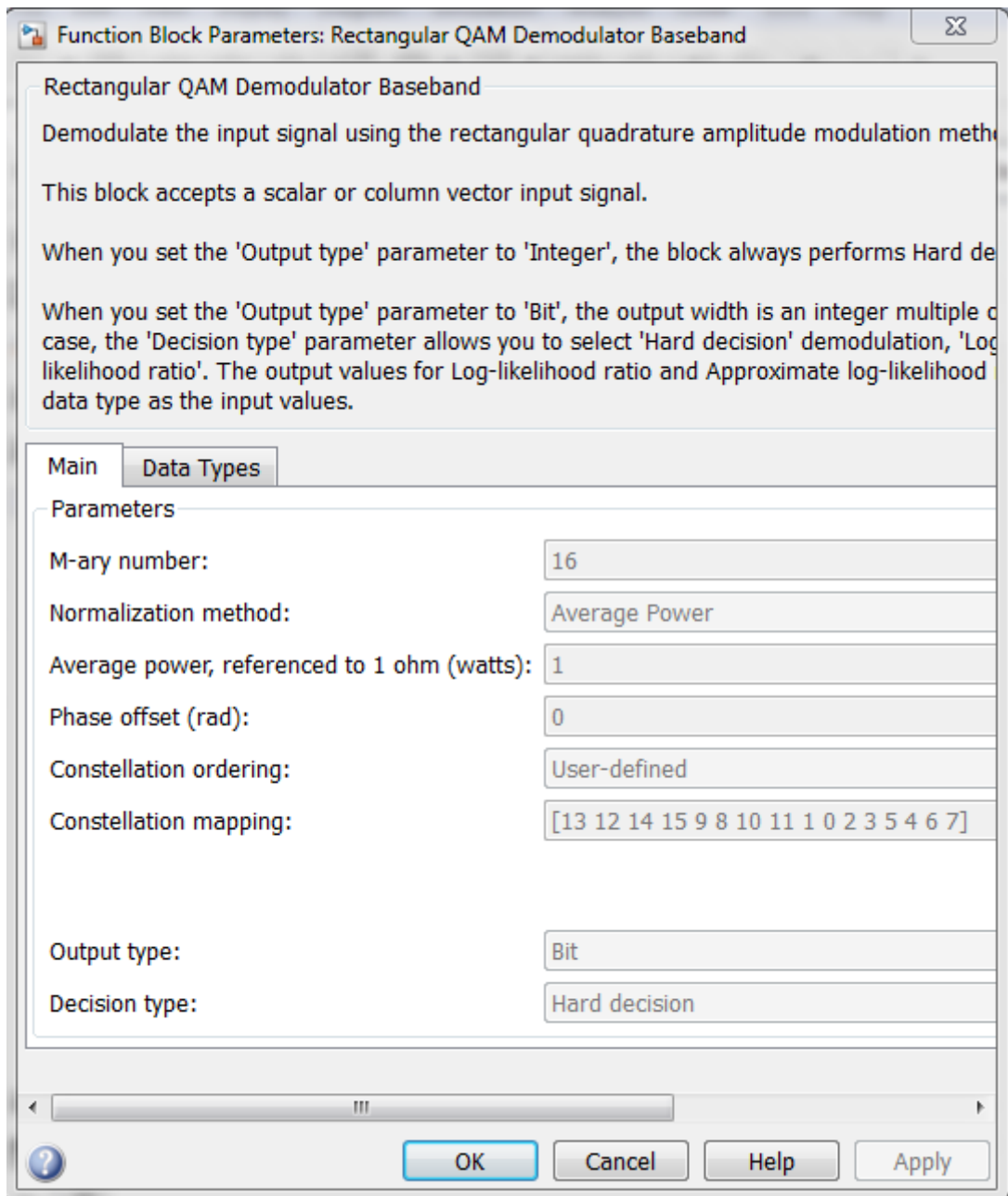


Рисунок 3.26 – Состав блока демодулятора «16-QAM Modulator 16QAM 1/2»

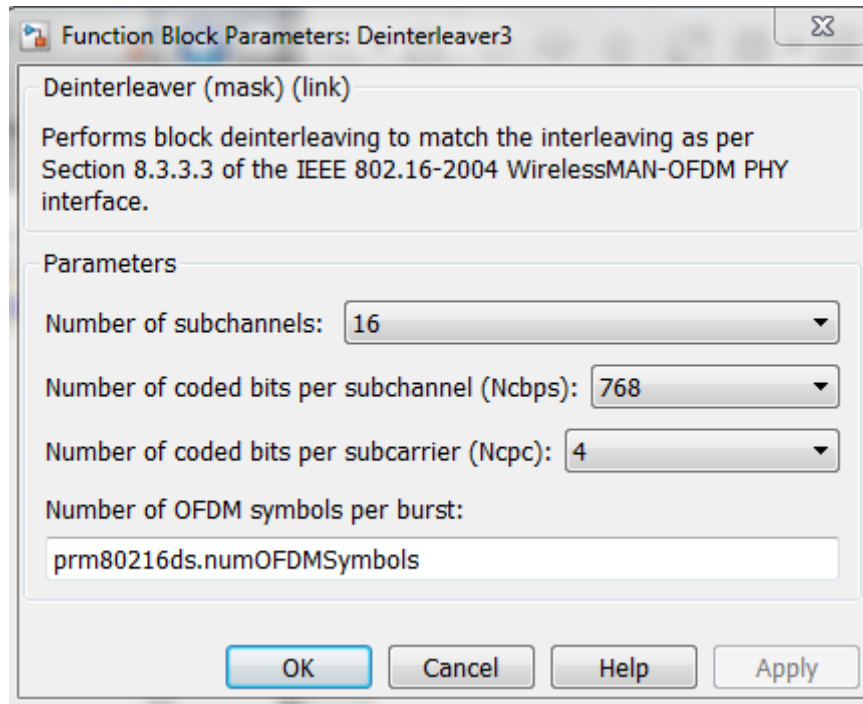


Рисунок 3.27 – Состав блока депережителя «Deinterleaver 16QAM 1/2»

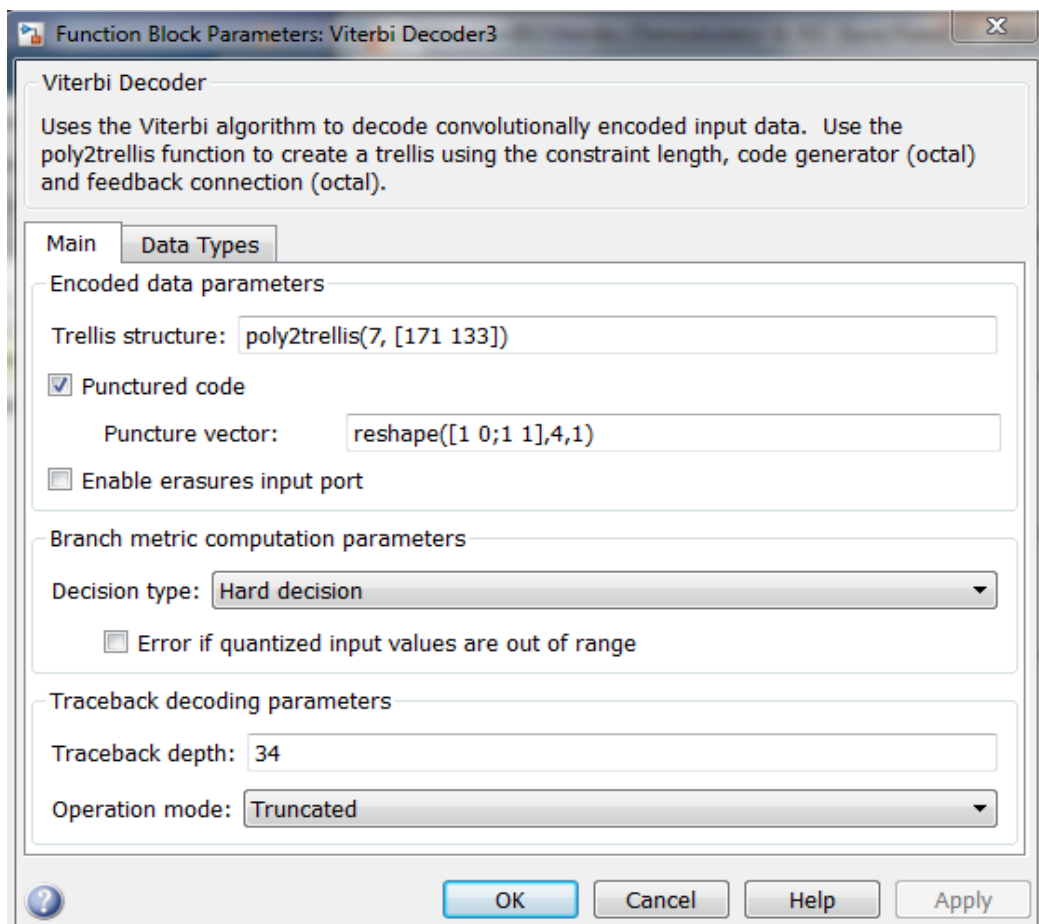


Рисунок 3.28 – Состав блока декодера Витерби «Viterbi Decoder 16QAM 1/2»

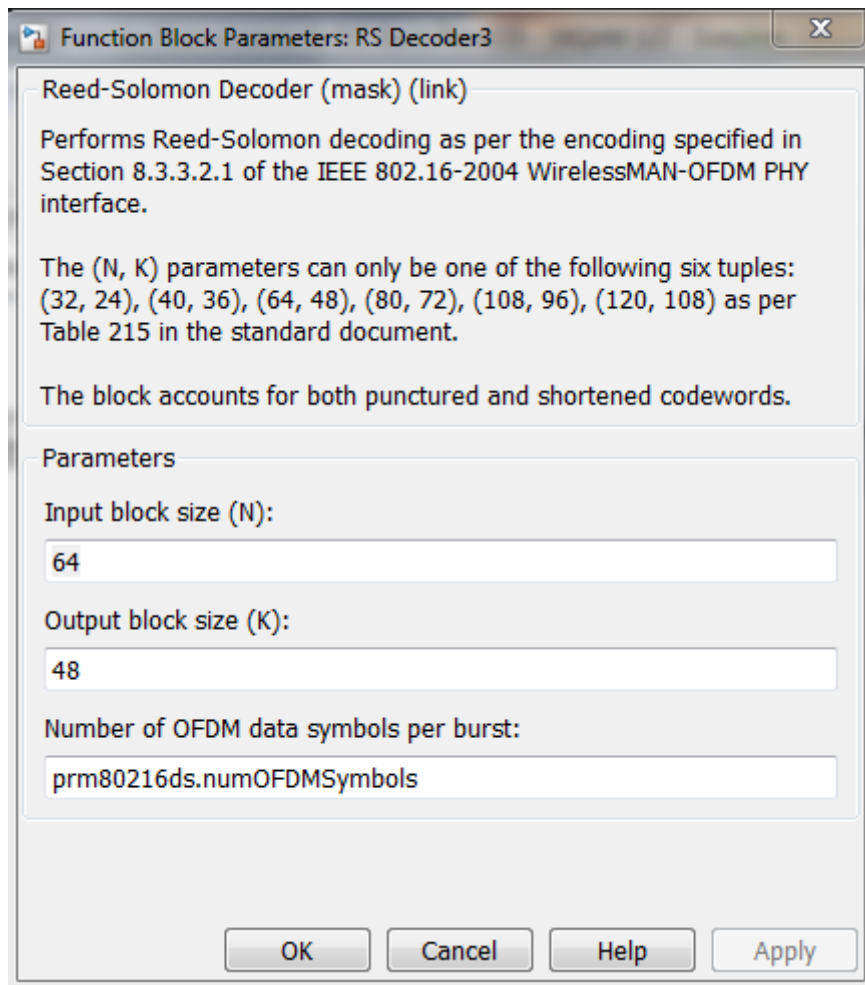


Рисунок 3.29 – Состав блока декодера Рида-Соломона «RS Decoder 16QAM 1/2»

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 3.2:

Таблица 3.2 – Изменение параметров модуляции и кодирования в зависимости от SNR

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

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

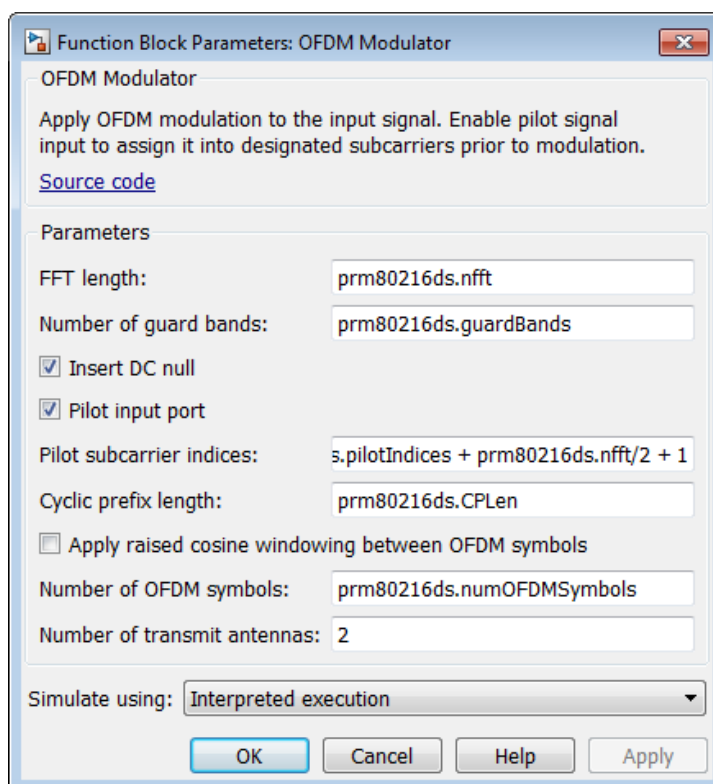


Рисунок 3.30 – Параметры системы, изменяемые в блоке «OFDM Modulator»

Параметры OFDM-демодулятора (блок «OFDM Demodulator», рисунок 3.31).

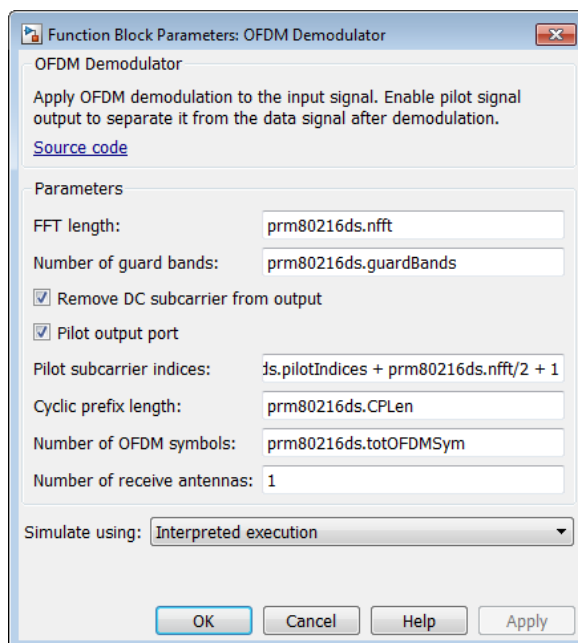


Рисунок 3.31 – Параметры системы, изменяемые в блоке «OFDM Demodulator»

Параметры канала MIMO (блок «MIMO Channel», рисунок 3.31).

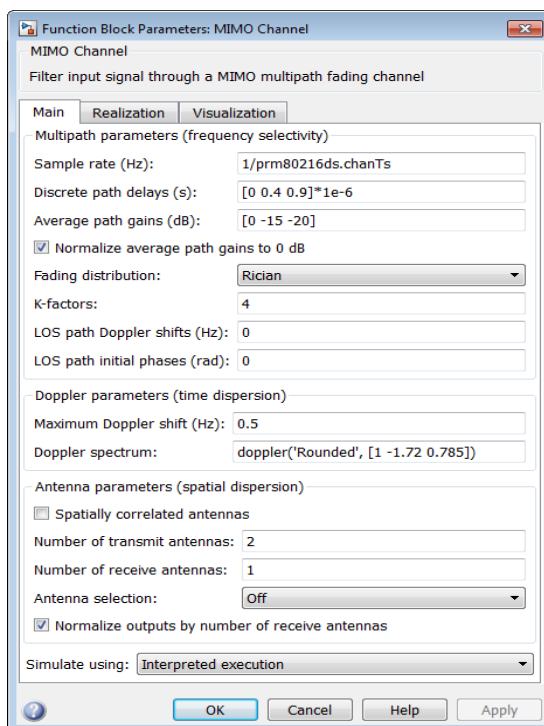


Рисунок 3.31 – Параметры системы, изменяемые в блоке «MIMO Channel»

Параметры канала AWGN (блок «AWGN Channel», рисунок 3.32).



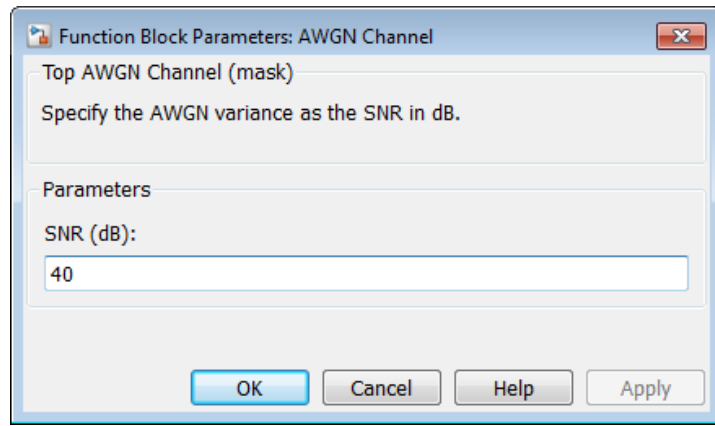


Рисунок 3.32 – Параметры системы, изменяемые в блоке «AWGN Channel»

### Результаты работы и их анализ

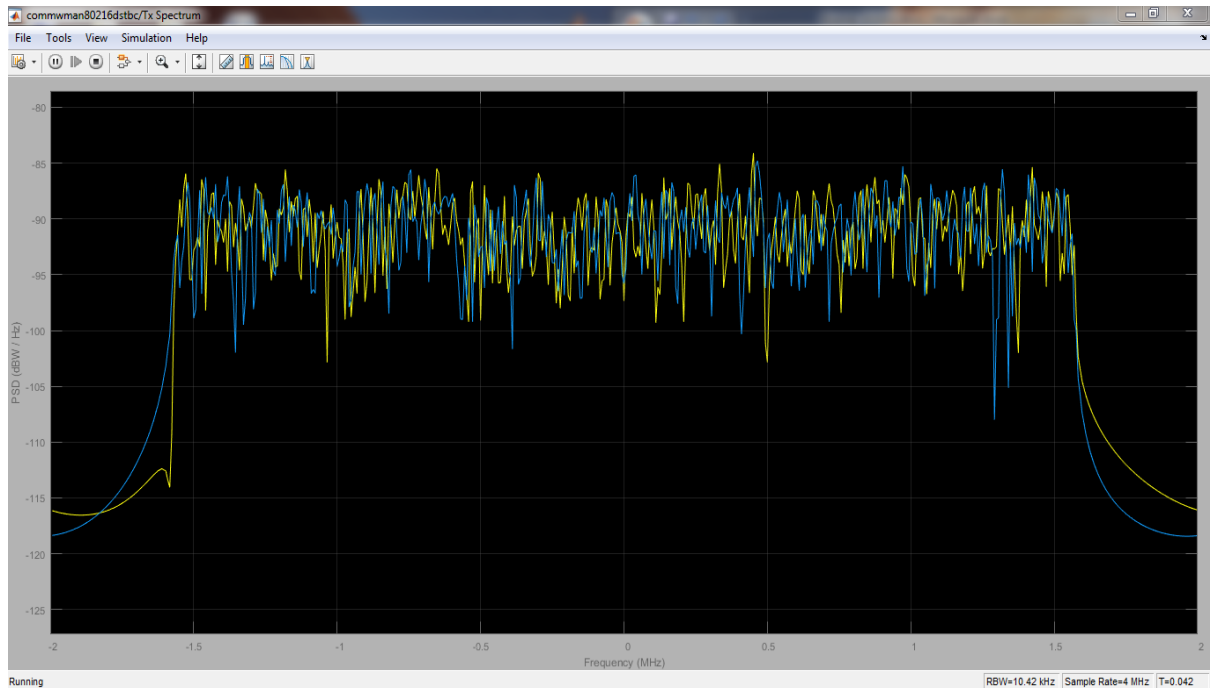


Рисунок 3.33 – Спектр передаваемых сигналов, поступающих на соответствующую передающую антенну

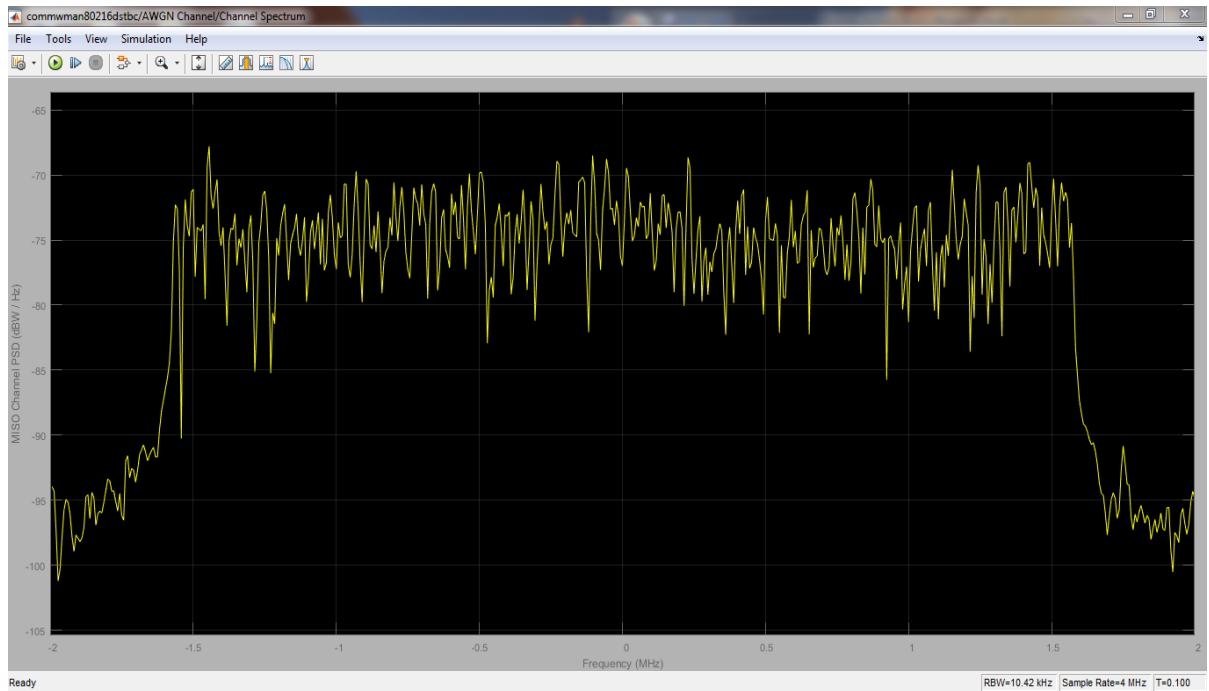


Рисунок 3.33 – Спектр принимаемого сигнала

Как было описано ранее, система адаптируется к условиям передачи, изменяя вид сигнально-кодовой конструкции сигнала (таблица 3.2). Необходимо исследовать поведение системы в зависимости от SNR в канале передачи (блок AWGN Channel), оформить полученные значения в виде графиков.

Созвездие принимаемого сигнала (BPSK):

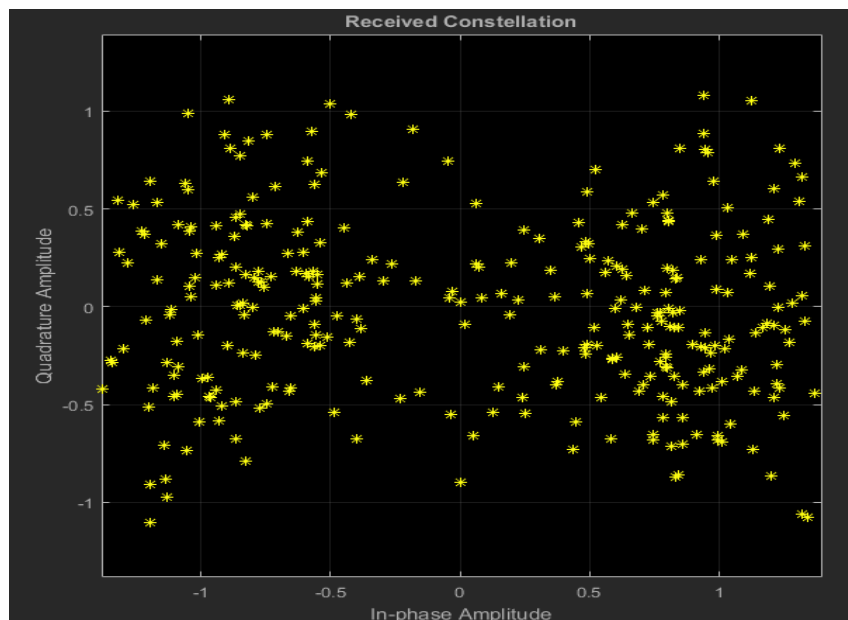


Рисунок 3.34 – Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 2)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-4):

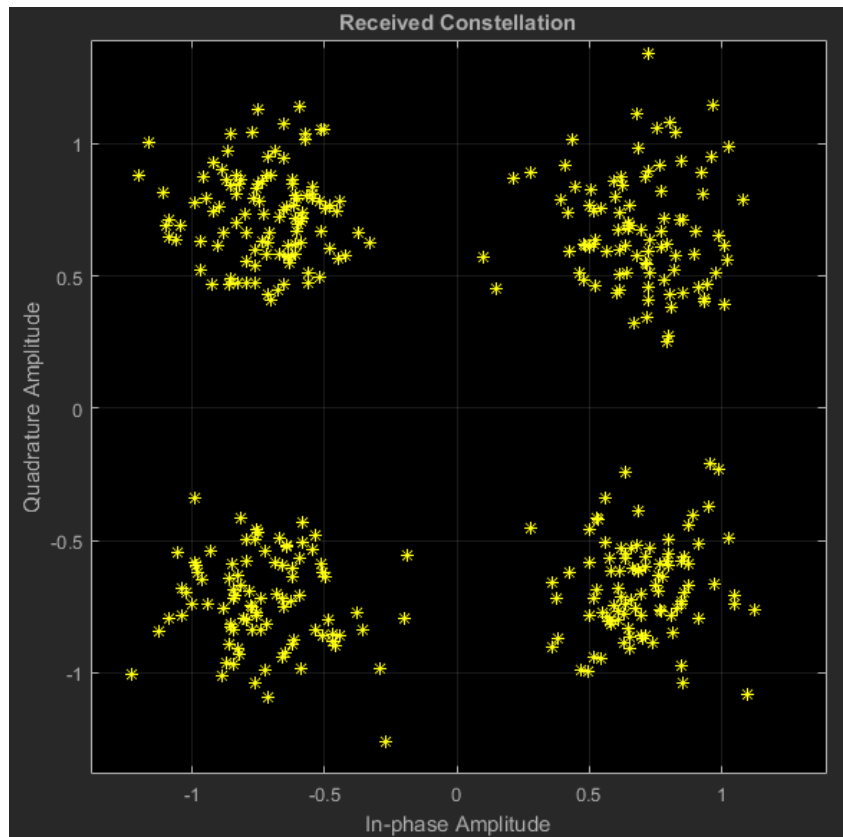


Рисунок 3.35 – Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 11)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-16):

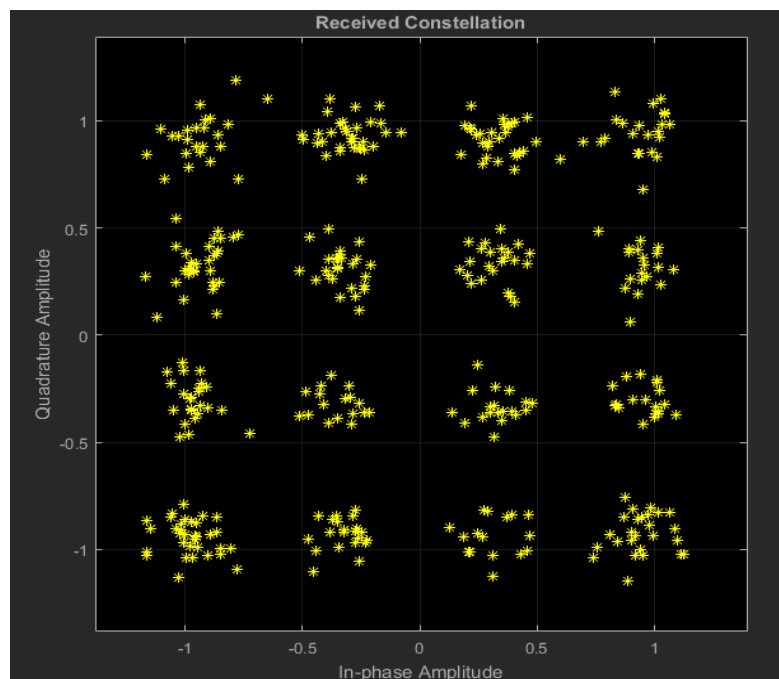


Рисунок 3.36 – Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 18)

Созвездие принимаемого сигнала (QAM-64):

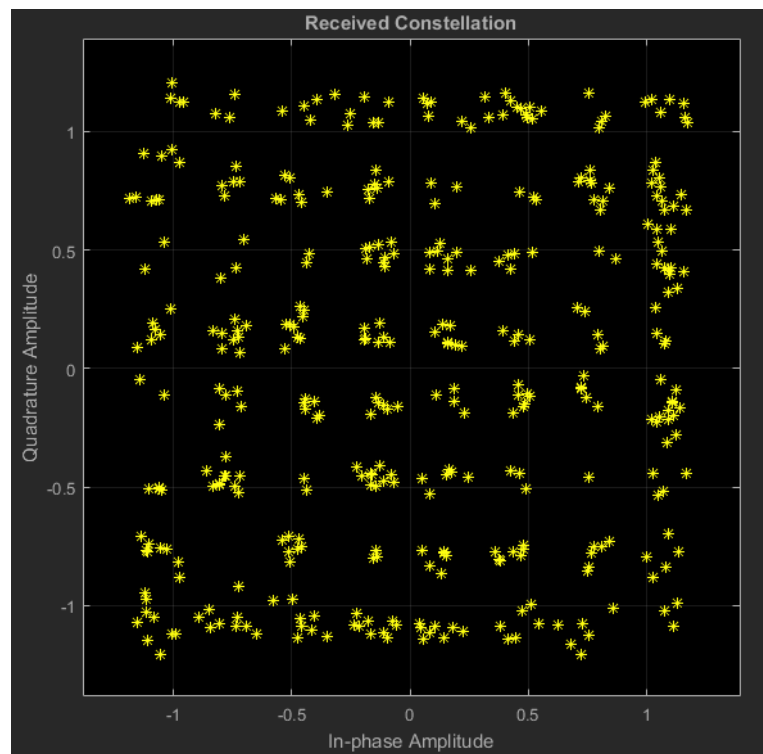


Рисунок 3.37 – Созвездие принимаемого сигнала (SNR = 22)

По данным блока «Bit Error Rate Display» можно построить график зависимости битовой вероятности ошибки (BER) от отношения сигнал/шум в канале (рисунок 3.38).

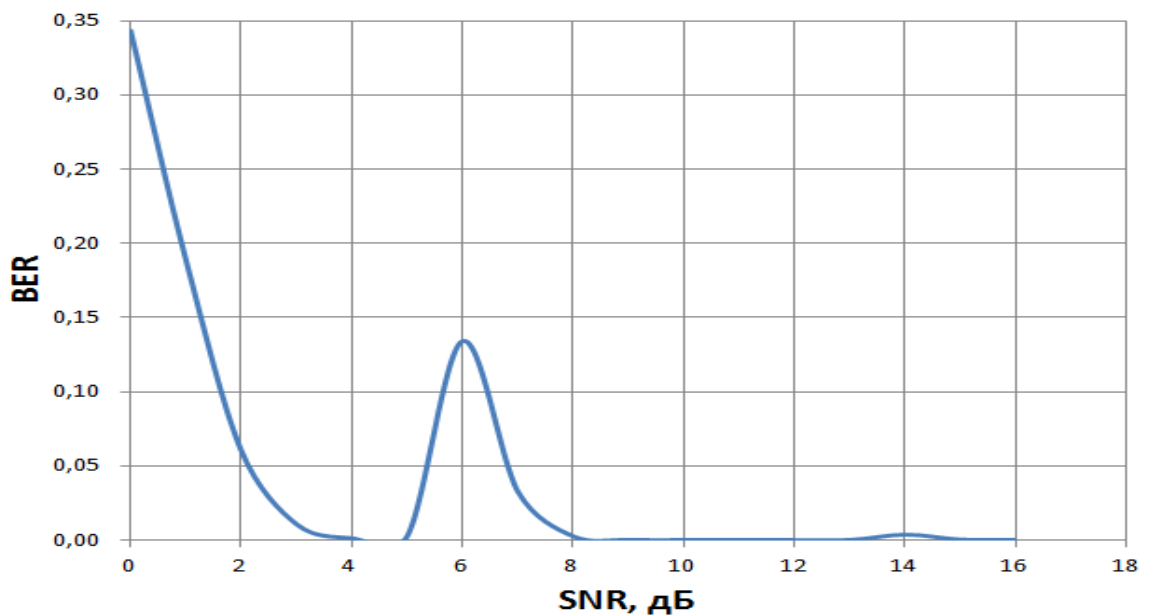


Рисунок 3.38 – Зависимость BER от SNR при использовании адаптивного изменения параметров.

Зависимости BER от SNR для каждого конкретного вида модуляции и скорости кодирования представлены на рисунке 3.39

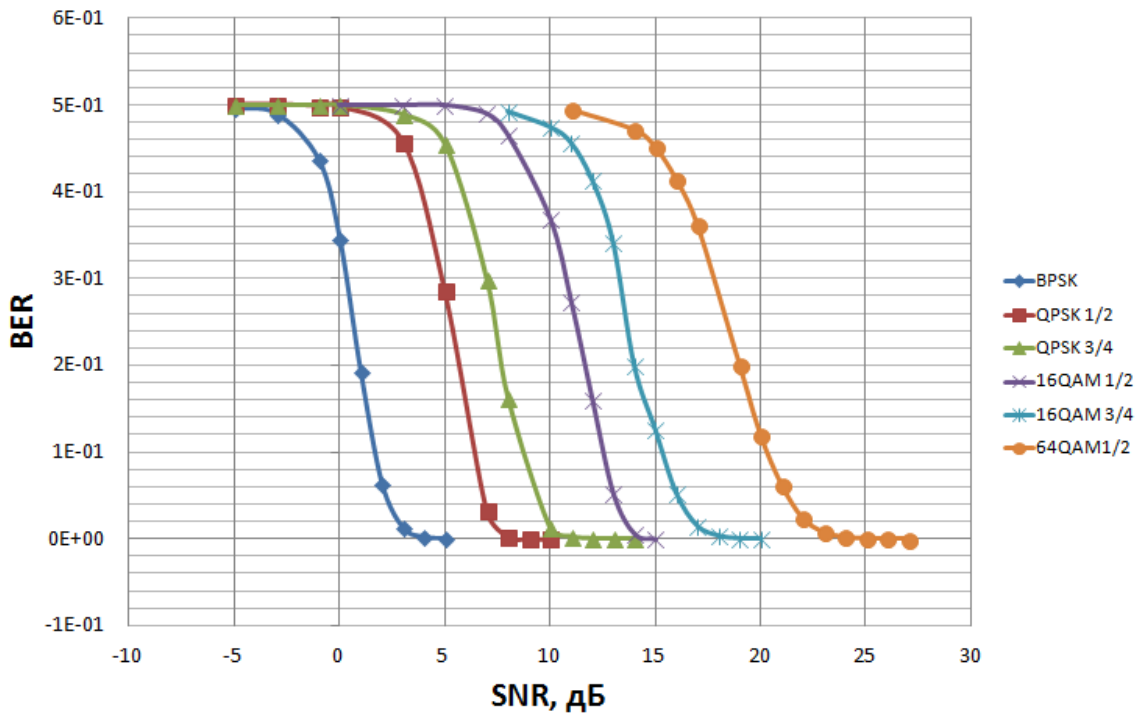


Рисунок 3.39 – Графики зависимости BER от SNR для отдельных видов модуляции и скорости кодирования

Та же зависимость в логарифмическом масштабе:

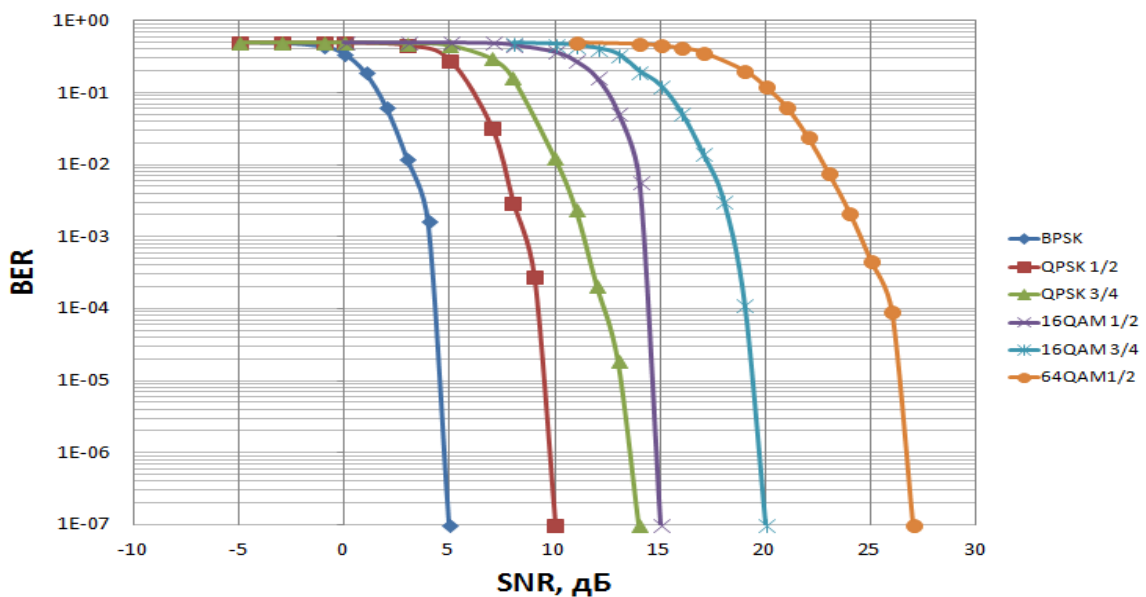


Рисунок 3.40 – Графики зависимости BER от SNR для отдельных видов модуляции и скорости кодирования. Логарифмическая шкала

Переход с одного вида модуляции на другой требует большей энергетике сигнала, но взамен происходит значительное увеличение скорости передачи. На рисунке 3.41 представлена зависимость принятого количества бит за 1 секунду (скорость передачи в Мбит/с) от SNR в канале.

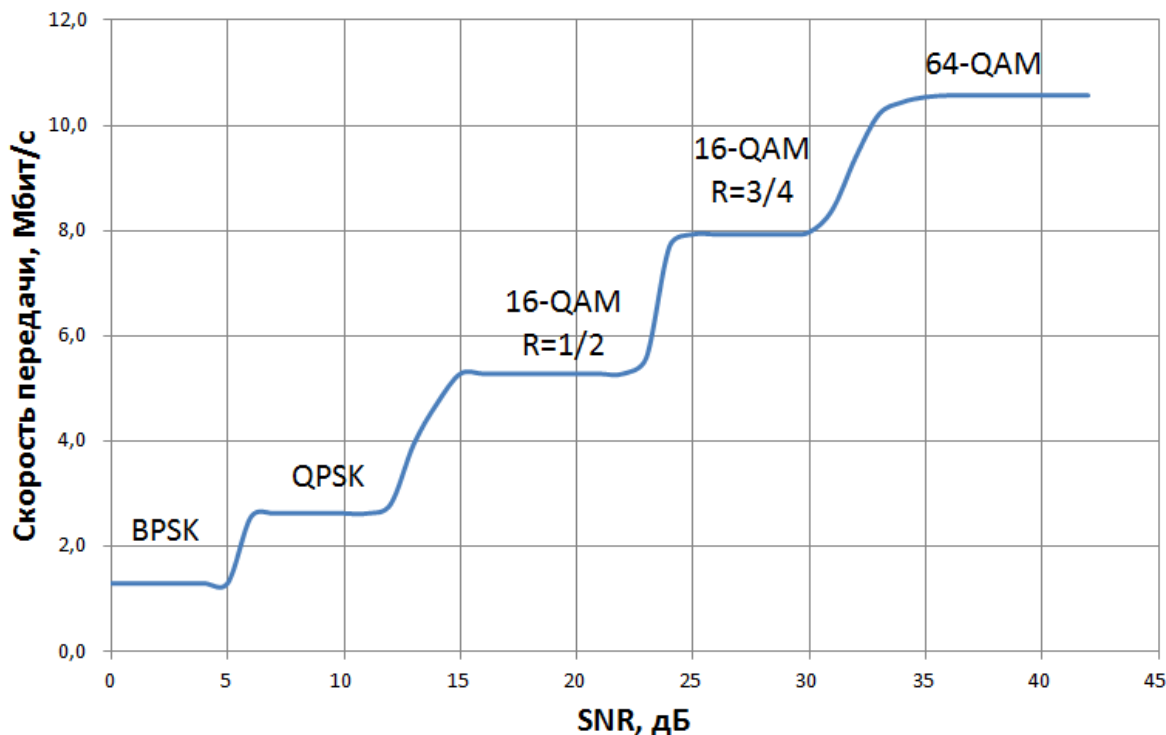


Рисунок 3.41 – График зависимости скорости передачи от SNR

После демодуляции и декодирования производится оценка SNR для принятых данных (блок «SNR Estimation»). Зависимость оцененного SNR от SNR в канале передачи приведена на рисунке 3.42

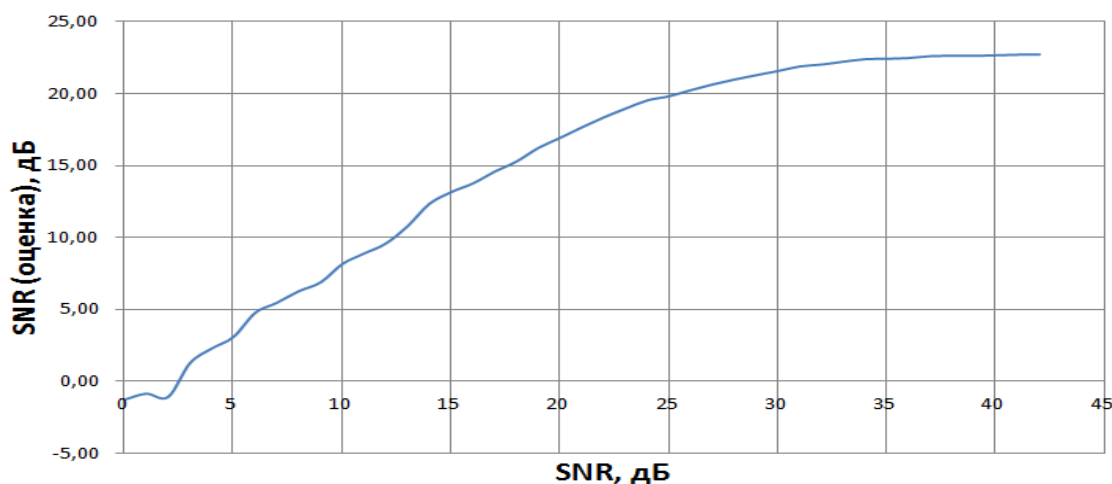


Рисунок 3.42 – График зависимости оценки SNR от SNR в канале передачи

### **Заключение**

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.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Голиков А.М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика: Учебное пособие / А.М. Голиков. - СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 452с.