

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 СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ
С ТЕХНОЛОГИЕЙ OFDM - MIMO**

Учебно-методическое пособие по лабораторной работе

Томск 2019

Голиков, А. М. Исследование систем мобильной связи с технологией OFDM - MIMO: Учебно-методическое пособие по лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. М. Голиков. — Томск: ТУСУР, 2019. — 27 с.

В лабораторной работе производится исследование систем мобильной связи с технологией OFDM - MIMO на базе 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

Введение	4
1. Технология OFDM	5
1.1 Ортогональное частотное разделение каналов	5
1.2 Структурная схема модулятора	7
1.3 Структурная схема демодулятора	9
1.4 Достоинства и недостатки OFDM	10
2. Технология MIMO	11
2.1 Особенности распространения радиоволн	11
2.2 Принцип работы и структурная схема MIMO.....	14
2.3 Применение MIMO	15
3. Исследование схем OFDM и MIMO модуляторов и демодуляторов	17
ЛИТЕРАТУРА.....	27

Введение

В процессе развития сетей передачи данных постоянно увеличиваются требования к скорости передачи информации и качеству предоставляемых сервисов. Данный механизм можно наблюдать и для сетей передачи данных, где средой передачи является радиоканал. Из-за этого в значительной степени усложняются сигналы, которые используют для передачи информации. Одним из перспективных видов является ортогональное частотное мультиплексирование OFDM.

В современных системах связи, например, в сотовых системах связи, высокоскоростных локальных вычислительных сетях и др., существует необходимость повышения пропускной способности. Пропускная способность может быть увеличена путём расширения полосы частот или повышения излучаемой мощности. Тем не менее, применимость этих методов ограничена из-за требований биологической защиты, ограниченной мощности источника питания (в мобильных устройствах) и электромагнитной совместимости. Поэтому если в системах связи эти подходы не обеспечивают необходимую скорость передачи данных, то эффективным может оказаться применение адаптивных антенных решёток со слабо коррелированными антенными элементами. Системы связи с такими антеннами получили название систем ММО.

1. Технология OFDM

OFDM основан на разделении потока входных данных на множество параллельных потоков, каждый из которых передается на своей несущей (ортогональной) частоте. Это обеспечивает высокую скорость и помехоустойчивость передачи информации, в частности, по отношению к провалам в спектре передаваемых сигналов, так как узкополосное затухание может исключить только одну или несколько несущих частот из их большого числа (сотни - тысячи). Поскольку модуляция OFDM использует для передачи ортогональные несущие колебания, то возможна демодуляция модулированных сигналов даже в условиях частичного перекрытия полос отдельных несущих. Наличие большого числа несущих не позволяет реализовать модуляцию OFDM непосредственно, т.е. с использованием нескольких тысяч синтезаторов несущих колебаний и нескольких тысяч модуляторов. Поэтому для уменьшения объема оборудования учитывают, что модуляция OFDM представляет собой обратное преобразование Фурье, а демодуляция прямое преобразование Фурье, и применяют быстрые алгоритмы двух этих преобразований, допускающие более простую аппаратную реализацию по сравнению с непосредственной реализацией алгоритмов модуляции OFDM. Модуляция OFDM используется в системах цифрового телевидения, системах сотовой связи WiMAX, MobileWiMAX, MBWA, автоматизированных системах контроля и учета электроэнергии, системах типа "интеллектуальный дом" и др. На ней базируются стандарты беспроводной связи IEEE 802.11a,e,g,n; 802.16a,d,e; 802.20.

1.1 Ортогональное частотное разделение каналов

При беспроводной передаче сигналов один и тот же сигнал в результате многократных отражений может поступать в приемник различными путями. Поэтому в точке приема результирующий сигнал представляет собой суперпозицию (интерференцию) многих сигналов с различными амплитудами и начальными фазами. Применительно к многолучевой интерференции, возникающей при передаче сигналов, различают два крайних случая. В первом случае максимальная задержка между различными сигналами не превышает длительности одного символа, и интерференция возникает в пределах одного передаваемого символа. Во втором случае максимальная задержка между различными сигналами больше длительности одного символа, и в результате интерференции складываются сигналы, представляющие разные символы. Вследствие этого возникает межсимвольная интерференция, которая наиболее сильно сказывается на искажении сигнала. Для того, чтобы частично компенсировать эффект многолучевого распространения, применяют частотные эквалайзеры, однако по мере роста скорости передачи данных либо за счет увеличения символьной скорости, либо за счет усложнения схемы кодирования, эффективность их применения падает. Поэтому для достижения высокой скорости передачи данных используют другой подход, состоящий в том, что поток передаваемых данных распределяется по множеству частотных подканалов и передача ведется параллельно на всех этих подканалах. При этом достигается высокая скорость пере-

дачи за счет одновременной передачи данных по всем каналам, причем скорость передачи в отдельном подканале может быть и невысокой. Это создает предпосылки для эффективного подавления межсимвольной интерференции. При частотном разделении каналов необходимо, чтобы ширина каждого канала была, с одной стороны, достаточно узкой для минимизации искажения сигнала Z в его пределах, а с другой - достаточно широкой для обеспечения требуемой скорости передачи. Кроме того, для экономного использования всей полосы канала, разделяемого на подканалы, желательно как можно плотнее расположить частотные подканалы, но при этом избежать межканальной интерференции для обеспечения полной независимости каналов друг от друга. Перечисленным требованиям удовлетворяют ортогональные частотные каналы. Функции, описывающие несущие сигналы всех этих каналов, ортогональны друг другу.

Ортогональность несущих сигналов обеспечивает частотную независимость каналов друг от друга и, следовательно, отсутствие межканальной интерференции. Рассмотренный способ деления широкополосного канала на ортогональные частотные подканалы называется ортогональным частотным разделением с мультиплексированием или OFDM- модуляцией.

Ортогональность несущих сигналов обеспечивается только тогда, когда за время длительности одного символа T несущий сигнал будет совершать целое число колебаний. Так как каждый символ длительности T передается ограниченной по времени синусоидальной функцией.

Несмотря на частичное перекрытие частотными подканалами друг друга (рис.1.1), ортогональность несущих сигналов обеспечивает их частотную независимость каналов друг от друга и, следовательно, отсутствие межканальной интерференции.

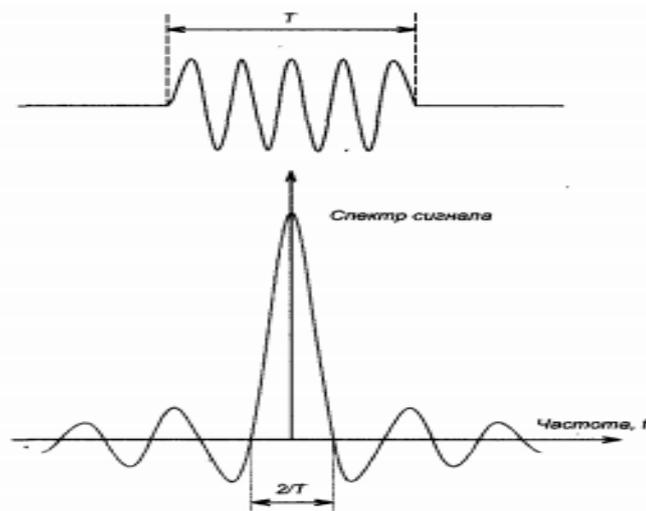


Рисунок 1.1 - Символ длительностью T и его спектральное представление

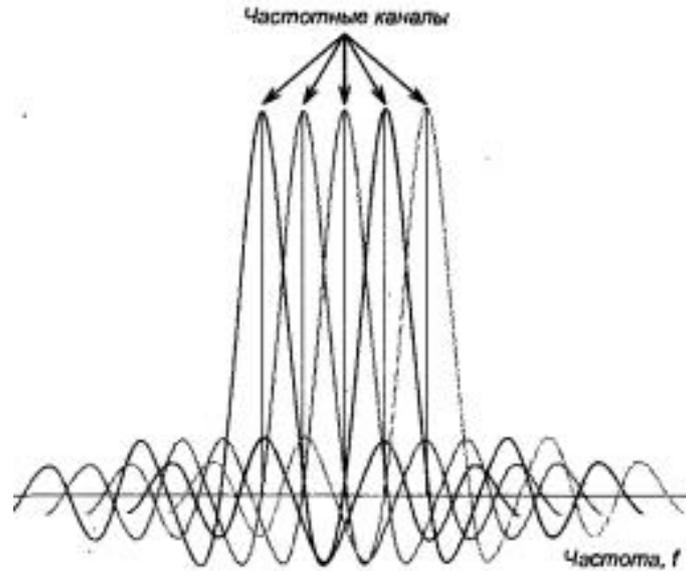


Рисунок 1.2 - Частотное разделение каналов с ортогональными несущими сигналами

1.2 Структурная схема модулятора

Принцип OFDM-модуляции заключается в следующем. В полосе канала связи передается множество несущих, каждая из которых модулируется, например, с использованием QAM-модуляции, частью общего цифрового потока. До преобразования спектра такого сигнала цифровой поток разбивается на последовательности, каждая из которых соответствует передаче kR_a битов информации, где R_a — число активных несущих, k — коэффициент используемой QAM-модуляции (или число битов информации, передаваемой на каждой активной несущей). Длительность T_0 интервала, на котором передаются все указанные kR_a битов информации, определяет минимальную частоту несущей $f_U = 1/T_0$ и интервал между несущими, т. е. частотный интервал $(R_a + R_n)f_U$, где R_n — число пассивных несущих, характеризует групповой спектр мощности радиосигнала.

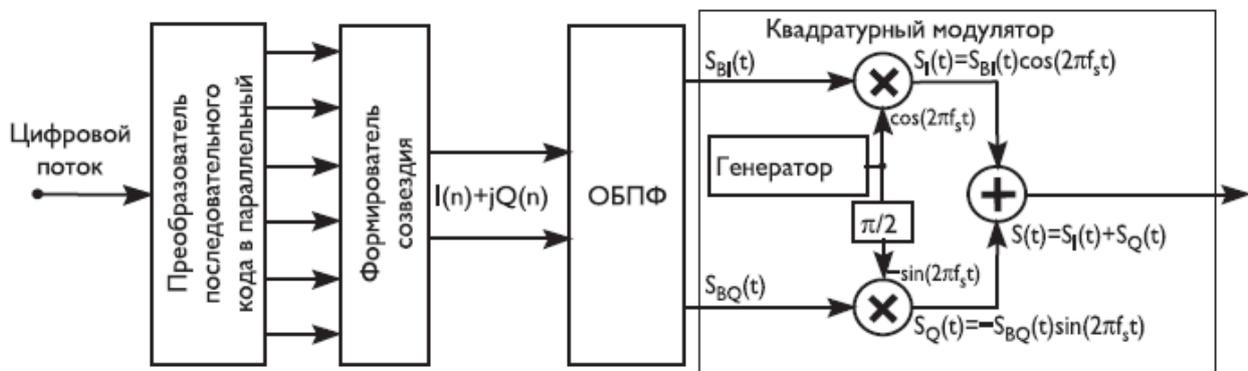


Рисунок 1.3 - Структурная схема идеального OFDM-модулятора.

Цифровой поток поступает на вход преобразователя последовательной информации в параллельную. На выходе этого преобразователя формируется

код, состоящий из k битов и соответствующий используемой QAM-модуляции несущих ($k = 2$ при QPSK, $k = 4$ при QAM-16, $k = 6$ при QAM-64 и т.д.). Последовательно каждые k битов преобразуются в параллельный код, который подается на формирователь созвездия, преобразующий этот код в значения соответствующих векторов звездной диаграммы, как показано, например, на рис. 1.4.

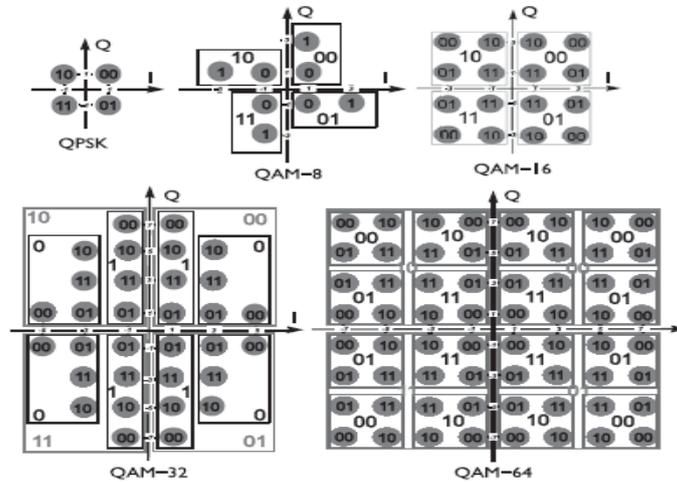


Рисунок 1.4 - Варианты сигнальных созвездий: QPSK, QAM-8, QAM-16, QAM-32 и QAM-64

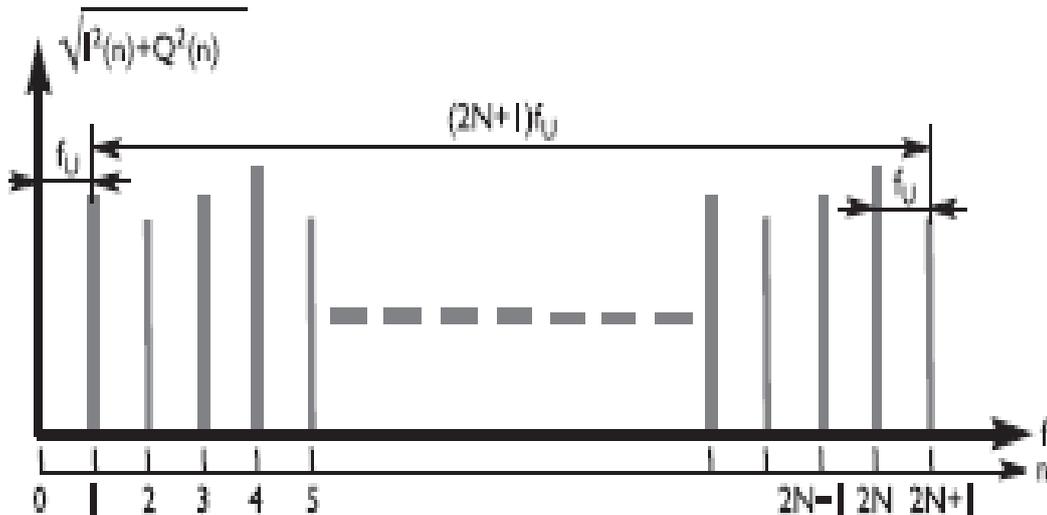


Рисунок 1.5 - График спектральных составляющих ОБПФ

В соответствии со схемой квадратурного модулятора эти два сигнала $SBI(t)$ и $SBQ(t)$ перемножаются соответственно на сдвинутые по фазе на 90° синусоидальные сигналы. На выходах перемножителей формируются две составляющие:

В результате суммирования этих двух составляющих окончательно формируется выходной сигнал OFDM-модулятора. При этом разностные частоты $(nf_0 - f_s)$ взаимно исключаются.

1.3 Структурная схема демодулятора

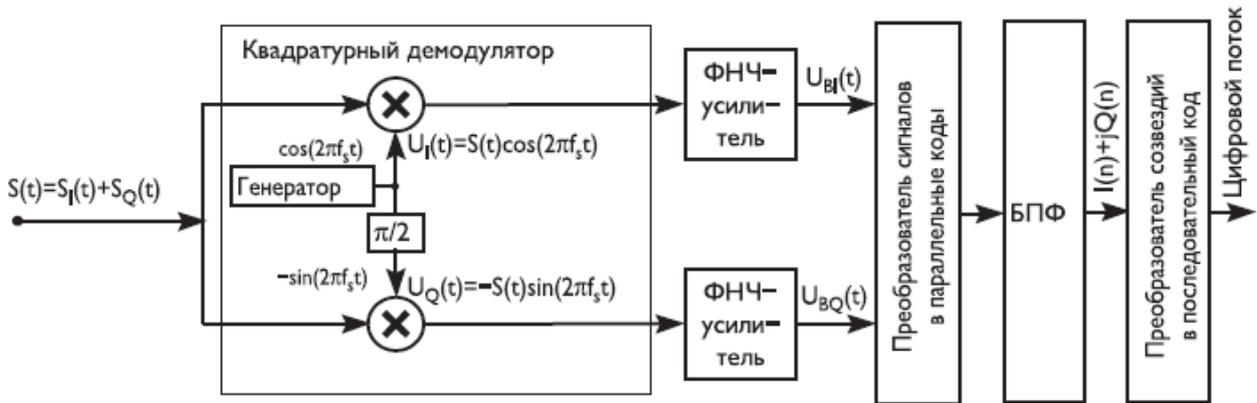


Рисунок 1.6 - Структурная схема идеального демодулятора.

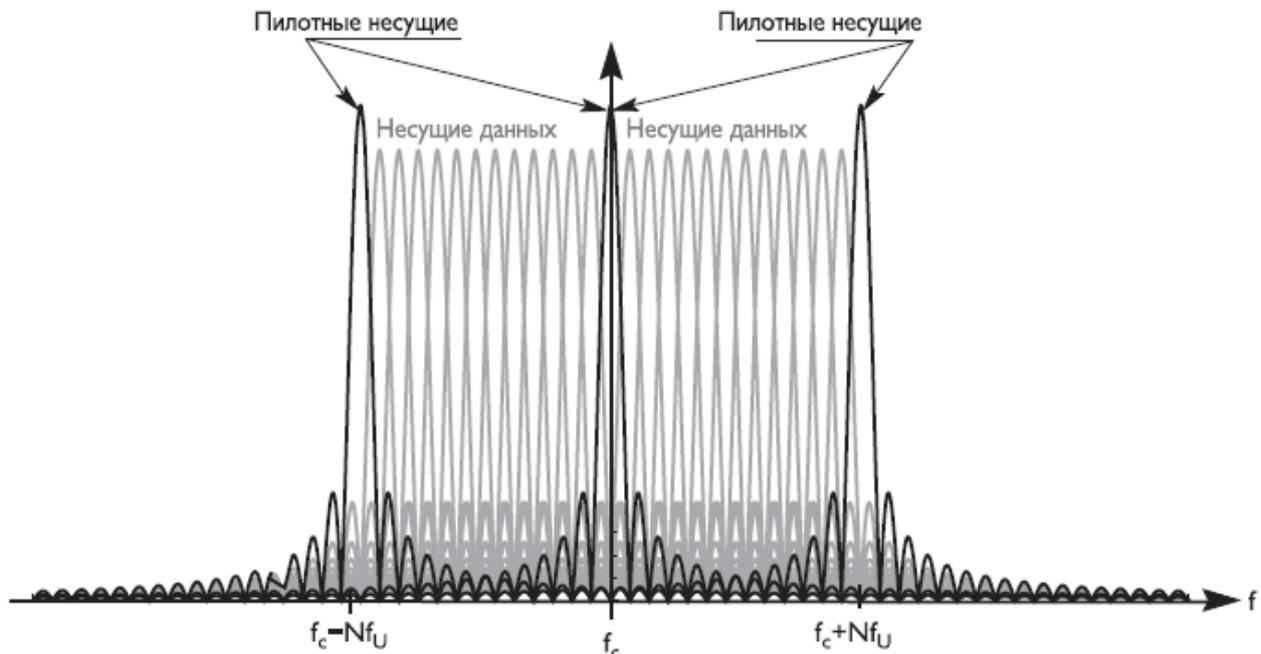


Рисунок 1.7 - Групповой спектр несущих частот.

На рис. 1.7 изображена структура группового спектра несущих частот OFDM-сигнала. Здесь условно показаны составляющие синусоидальные сигналы, промодулированные соответствующими данными созвездий дискретной QAM-модуляции. В составе сигнала имеются также специальные пилотные несущие, на которых передается информация о параметрах системы. Эти пилотные несущие используются также для обеспечения устойчивой синхронизации и коррекции характеристик в демодуляторе.

Таким образом, в системах с OFDM модуляцией передаваемая цифровая информация разделена на большое число низкоскоростных подканалов, длительность тактового интервала передачи каждой несущей весьма велика. Такое построение системы преобразует широкополосный канал с одной несущей в

большое число независимых узкополосных каналов с частотным разделением, что упрощает коррекцию параметров затухающего сигнала. Более того, ряд групп несущих может быть полностью подавлен при приеме, если дополнительно вводится корректирующее кодирование данных в сочетании с временным и частотным перемежением. При таком построении системы модуляцию часто называют COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing — кодированное ортогональное частотное мультиплексирование, разновидность технологии OFDM, сочетающая канальное кодирование и OFDM).

На рис. 1.7 приведена структурная схема идеального демодулятора, содержащего квадратурный демодулятор и ряд преобразователей, формирующих передаваемую цифровую информацию.

1.4 Достоинства и недостатки OFDM

Плюсы

- Высокая эффективность использования радиочастотного спектра, объясняемая почти прямоугольной формой огибающей спектра при большом количестве поднесущих.
- Простая аппаратная реализация: базовые операции реализуются методами цифровой обработки.
- Хорошее противостояние межсимвольным помехам (ISI – intersymbol interference) и интерференции между поднесущими (ICI – intercarrier interference).
- Возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации.

Минусы

- Необходима высокая синхронизация частоты и времени.
- Чувствительность к эффекту Доплера, ограничивающая применение OFDM в мобильных системах.
- Не идеальность современных приёмников и передатчиков вызывает фазовый шум, что ограничивает производительность системы.
- Защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с многолучевым распространением, снижает спектральную эффективность сигнала.

2. Технология ММО

ММО (Multiple Input Multiple Output – множественный вход множественный выход) – это технология, используемая в беспроводных системах связи (WIFI, WI-MAX, сотовые сети связи), позволяющая значительно улучшить спектральную эффективность системы, максимальную скорость передачи данных и емкость сети. Главным способом достижения указанных выше преимуществ является передача данных от источника к получателю через несколько радио соединений, откуда данная технология и получила свое название. Рассмотрим предысторию данного вопроса, и определим основные причины, послужившие широкому распространению технологии ММО.

Необходимость в высокоскоростных соединениях, предоставляющих высокие показатели качества обслуживания (QoS) с высокой отказоустойчивостью растет от года в год. Этому в значительной мере способствует появление таких сервисов как VoIP (Voice over Internet Protocol), видеоконференции, VoD (Video on Demand) и др. Однако большинство беспроводных технологий не позволяют предоставить абонентам высокое качество обслуживания на краю зоны покрытия. В сотовых и других беспроводных системах связи качество соединения, также как и доступная скорость передачи данных стремительно падает с удалением от базовой станции (BTS). Вместе с этим падает и качество услуг, что в итоге приводит к невозможности предоставления услуг реального времени с высоким качеством на всей территории радио покрытия сети. Для решения данной проблемы можно попробовать максимально плотно установить базовые станции и организовать внутреннее покрытие во всех местах с низким уровнем сигнала. Однако это потребует значительных финансовых затрат что в конечном счете приведет к росту стоимости услуги и снижению конкурентоспособности. Таким образом, для решения данной проблемы требуется оригинальное нововведение, использующее, по возможности, текущий частотный диапазон и не требующее строительства новых объектов сети.

2.1 Особенности распространения радиоволн

Для того чтобы понять принципы действия технологии ММО необходимо рассмотреть общие принципы распространения радио волн в пространстве. Волны, излучаемые различными системами беспроводной радиосвязи в диапазоне свыше 100 МГц, во многом ведут себя как световые лучи. Когда радиоволны при распространении встречаются какую-либо поверхность, то в зависимости от материала и размера препятствия часть энергии поглощается, часть проходит насквозь, а оставшаяся – отражается. На соотношение долей поглощенной, отраженной и прошедшей насквозь частей энергий влияет множество внешних факторов, в том числе и частота сигнала. Причем отраженная и прошедшая насквозь энергии сигнала могут изменить направление своего дальнейшего распространения, а сам сигнал разбивается на несколько волн.

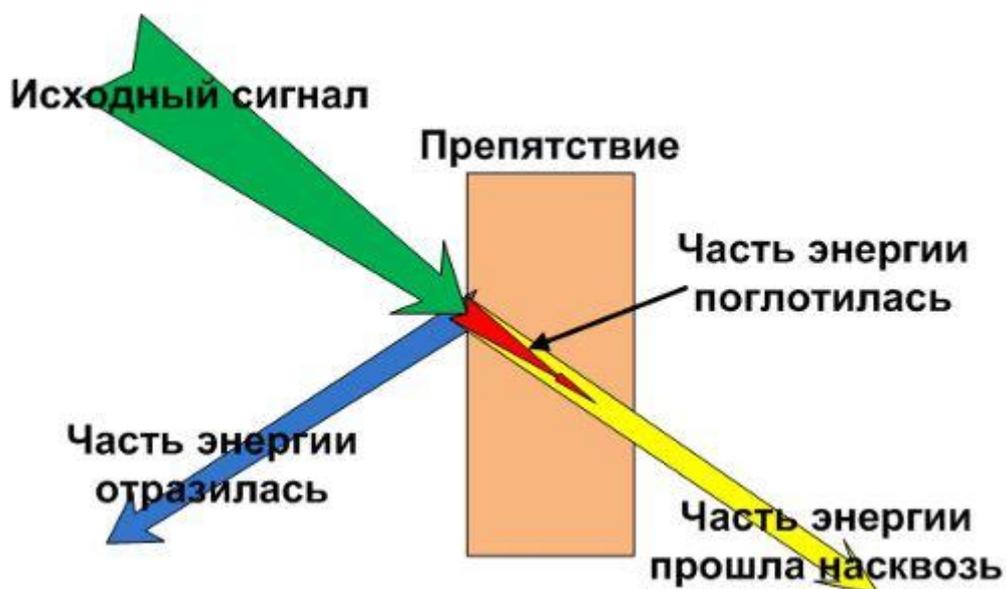


Рисунок 2.1 - Распределение энергии сигнала при взаимодействии с препятствием

Распространяющийся по вышеуказанным законам сигнал от источника к получателю после встречи с многочисленными препятствиями разбивается на множество волн, лишь часть из которых достигнет приемник. Каждая из дошедших до приемника волн образует так называемый путь распространения сигнала. Причем из-за того, что разные волны отражаются от разного числа препятствий и проходят разное расстояние, различные пути имеют разные временные задержки.

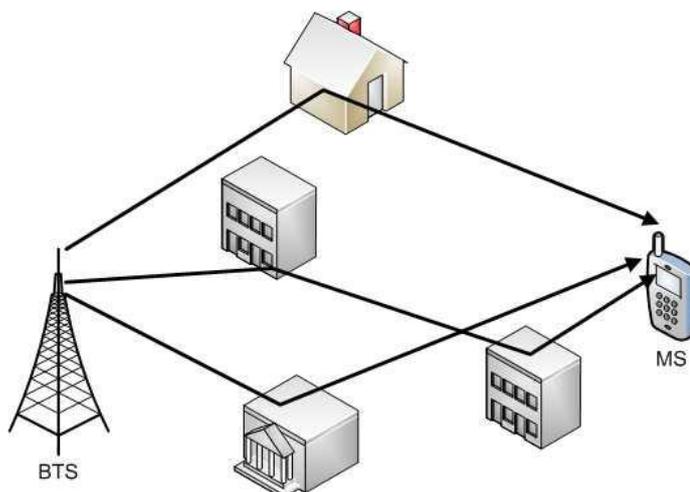


Рисунок 2.2 - Пример многолучевого распространения сигнала

В условиях плотной городской постройки, из-за большого числа препятствий, таких как здания, деревья, автомобили и др., очень часто возникает ситуация, когда между абонентским оборудованием (MS) и антеннами базовой станции (BTS) отсутствует прямая видимость. В этом случае, единственным вариантом достижения сигнала приемника являются отраженные волны. Одна-

ко, как отмечалось выше, многократно отраженный сигнал уже не обладает исходной энергией и может прийти с запозданием. Особую сложность также создает тот факт, что объекты не всегда остаются неподвижными и обстановка может значительно измениться с течением времени. В связи с этим возникает проблема многолучевого распространения сигнала – одна из наиболее существенных проблем в беспроводных системах связи.

Для борьбы с многолучевым распространением сигналов применяется несколько различных решений. Одной из наиболее распространенных технологий является Receive Diversity – разнесенный прием. Суть его заключается в том, что для приема сигнала используется не одна, а сразу несколько антенн (обычно две, реже четыре), расположенные на расстоянии друг от друга. Таким образом, получатель имеет не одну, а сразу две копии переданного сигнала, прошедшего различными путями. Это дает возможность собрать больше энергии исходного сигнала, т.к. волны, принятые одной антенной, могут не быть приняты другой и наоборот. Также сигналы, приходящие в противофазе к одной антенне, могут приходить к другой синфазно. Эту схему организации радио интерфейса можно назвать Single Input Multiple Output (SIMO), в противовес стандартной схеме Single Input Single Output (SISO). Также может быть применен обратный подход: когда используется несколько антенн на передачу и одна на прием. Благодаря этому также увеличивается общая энергия исходного сигнала, полученная приемником. Эта схема называется Multiple Input Single Output (MISO). В обеих схемах (SIMO и MISO) несколько антенн устанавливаются на стороне базовой станции, т.к. реализовать разнесение антенн в мобильном устройстве на достаточно большое расстояние сложно без увеличения габаритов самого оконечного оборудования.

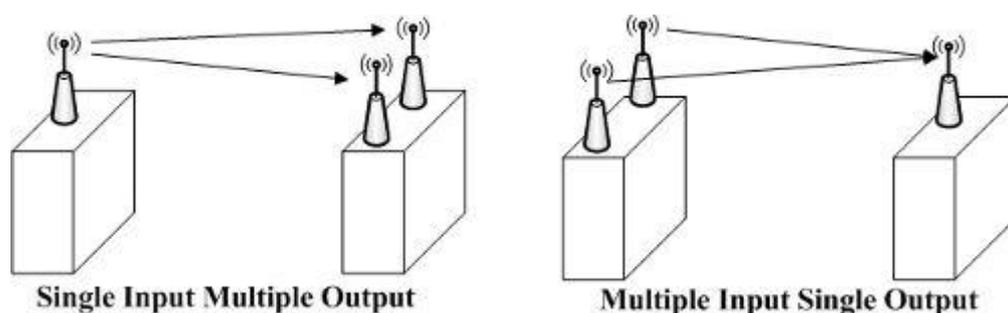


Рисунок 2.3 – Применение нескольких антенн

В результате дальнейших рассуждений мы приходим к схеме Multiple Input Multiple Output (MIMO). В этом случае устанавливаются несколько антенн на передачу и прием. Однако в отличие от указанных выше схем эта схема разнесения позволяет не только бороться с многолучевым распространением сигнала, но и получить некоторые дополнительные преимущества. За счет использования нескольких антенн на передаче и приеме каждой паре, передающей/приемной антенне можно сопоставить отдельный тракт для передачи информации. При этом разнесенный прием будет выполняться оставшимися ан-

теннами, а данная антенна также будет выполнять функции дополнительной антенны для других трактов передачи. В результате, теоретически, можно увеличить скорость передачи данных во столько раз, сколько дополнительных антенн будет использоваться. Однако существенное ограничение накладывается качеством каждого радио тракта.

2.2 Принцип работы и структурная схема MIMO

Как уже отмечалось выше, для организации технологии MIMO необходима установка нескольких антенн на передающей и на приемной стороне. Обычно устанавливается равное число антенн на входе и выходе системы, т.к. в этом случае достигается максимальная скорость передачи данных. Чтобы показать число антенн на приеме и передаче вместе с названием технологии «MIMO» обычно упоминается обозначение « $A \times B$ », где A – число антенн на входе системы, а B – на выходе. Под системой в данном случае понимается радио соединение.

Для работы технологии MIMO необходимы некоторые изменения в структуре передатчика по сравнению с обычными системами. Рассмотрим лишь один из возможных, наиболее простых, способов организации технологии MIMO. В первую очередь, на передающей стороне необходим делитель потоков, который будет разделять данные, предназначенные для передачи на несколько низкоскоростных подпорогов, число которых зависит от числа антенн. Например, для MIMO 4×4 и скорости поступления входных данных 200 Мбит/сек делитель будет создавать 4 потока по 50 Мбит/сек каждый. Далее каждый из данных потоков должен быть передан через свою антенну. Обычно, антенны на передаче устанавливаются с некоторым пространственным разнесением, чтобы обеспечить как можно большее число побочных сигналов, которые возникают в результате переотражений. В одном из возможных способов организации технологии MIMO сигнал передается от каждой антенны с различной поляризацией, что позволяет идентифицировать его при приеме. Однако в простейшем случае каждый из передаваемых сигналов оказывается промаркированным самой средой передачи (задержкой во времени, затуханием и другими искажениями).

На приемной стороне несколько антенн принимают сигнал из радиоэфира. Причем антенны на приемной стороне также устанавливаются с некоторым пространственным разнесением, за счет чего обеспечивается разнесенный прием, обсуждавшийся ранее. Принятые сигналы поступают на приемники, число которых соответствует числу антенн и трактов передачи. Причем на каждый из приемников поступают сигналы от всех антенн системы. Каждый из таких сумматоров выделяет из общего потока энергию сигнала только того тракта, за который он отвечает. Делает он это либо по какому-либо заранее предусмотренному признаку, которым был снабжен каждый из сигналов, либо благодаря анализу задержки, затухания, сдвига фазы, т.е. набору искажений или «отпечатку» среды распространения. В зависимости от принципа работы системы (Bell Laboratories Layered Space-Time - BLAST, Selective Per Antenna Rate

Control (SPARC) и т.д.), передаваемый сигнал может повторяться через определенное время, либо передаваться с небольшой задержкой через другие антенны.

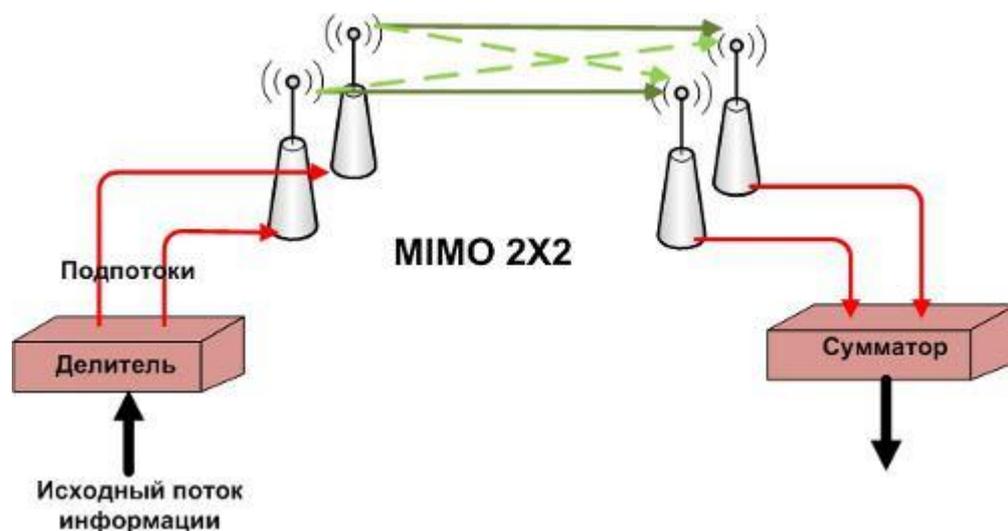


Рисунок 2.4 – Принцип организации технологии MIMO

В системе с технологией MIMO может возникнуть необычное явление, которое заключается в том, что скорость передачи данных в системе MIMO может снизиться в случае появления прямой видимости между источником и приемником сигнала. Это обусловлено в первую очередь уменьшением выраженности искажений окружающего пространства, который маркирует каждый из сигналов. В результате на приемной стороне становится проблематичным разделить сигналы, и они начинают оказывать влияние друг на друга. Таким образом, чем выше качество радио соединения, тем меньше преимуществ можно получить от MIMO.

2.3 Применение MIMO

Технология MIMO в последнее десятилетие является одним из самых актуальных способов увеличения пропускной способности и емкости беспроводных систем связи. Рассмотрим некоторые примеры использования MIMO в различных системах связи.

Стандарт WiFi - IEEE

802.11n – один из наиболее ярких примеров использования технологии MIMO. Согласно ему, он позволяет поддерживать скорость до 300 Мбит/сек. Причем предыдущий стандарт 802.11g позволял предоставлять лишь 50 Мбит/сек. Кроме увеличения скорости передачи данных, новый стандарт благодаря MIMO также позволяет обеспечить лучшие характеристики качества обслуживания в местах с низким уровнем сигнала. 802.11n используется не только в системах точка/многоточка (Point/Multipoint) – наиболее привычной нише использования технологии WiFi для организации LAN (Local Area Network), но и для организации соединений типа точка/точка которые используются для ор-

ганизации магистральных каналов связи со скоростью несколько сотен Мбит/сек и позволяющих передавать данные на десятки километров (до 50 км).

Стандарт WiMAX также имеет два релиза, которые раскрывают новые возможности перед пользователями с помощью технологии MIMO. Первый – 802.16e – предоставляет услуги мобильного широкополосного доступа. Он позволяет передавать информацию со скоростью до 40 Мбит/сек в направлении от базовой станции к абонентскому оборудованию. Однако MIMO в 802.16e рассматривается как опция и используется в простейшей конфигурации – 2x2. В следующем релизе 802.16m MIMO рассматривается как обязательная технология, с возможной конфигурацией 4x4. В данном случае WiMAX уже можно отнести к сотовым системам связи, а именно четвертому их поколению (за счет высокой скорости передачи данных), т.к. обладает рядом присущих сотовым сетям признаков: роуминг, хэндовер, голосовые соединения. В случае мобильного использования, теоретически, может быть достигнута скорость 100 Мбит/сек. В фиксированном исполнении скорость может достигать 1 Гбит/сек.

Наибольший интерес представляет использование технологии MIMO в системах сотовой связи. Данная технология находит свое применение, начиная с третьего поколения систем сотовой связи. Например, в стандарте UMTS, в Rel. 6 она используется совместно с технологией HSPA с поддержкой скоростей до 20 Мбит/сек, а в Rel. 7 – с HSPA+, где скорости передачи данных достигают 40 Мбит/сек. Однако в системах 3G MIMO так и не нашла широкого применения.

Системы 4G, а именно LTE, также предусматривают использование MIMO в конфигурации до 8x8. Это в теории может дать возможность передавать данные от базовой станции к абоненту свыше 300 Мбит/сек. Также важным положительным моментом является устойчивое качество соединения даже на краю соты. При этом даже на значительном удалении от базовой станции, или при нахождении в глухом помещении будет наблюдаться лишь незначительное снижение скорости передачи данных.

Таким образом, технология MIMO находит применение практически во всех системах беспроводной передачи данных. Причем потенциал ее не исчерпан. Уже сейчас разрабатываются новые варианты конфигурации антенн, вплоть до 64x64 MIMO. Это в будущем позволит добиться еще больших скоростей передачи данных, емкости сети и спектральной эффективности.

3. Исследование схем OFDM и MIMO модуляторов и демодуляторов

Для исследования OFDM:

1. Изменяя вероятность нуля (probability of a zero) от 0 до 1 с шагом 0,1 снять зависимость частоты ошибок от вероятности нуля. Построить график.
2. Изменяя отношение сигнал/шум от 0 дБ до 20 дБ с шагом 1 снять зависимость частоты ошибок от отношения сигнал/шум.
3. Снять созвездие «IFFT + white noise on amplitude Constellation» для значений отношения сигнал/шум 5 дБ, 10 дБ, 20 дБ.

Схема исследования OFDM представлена на рисунке 3.1:

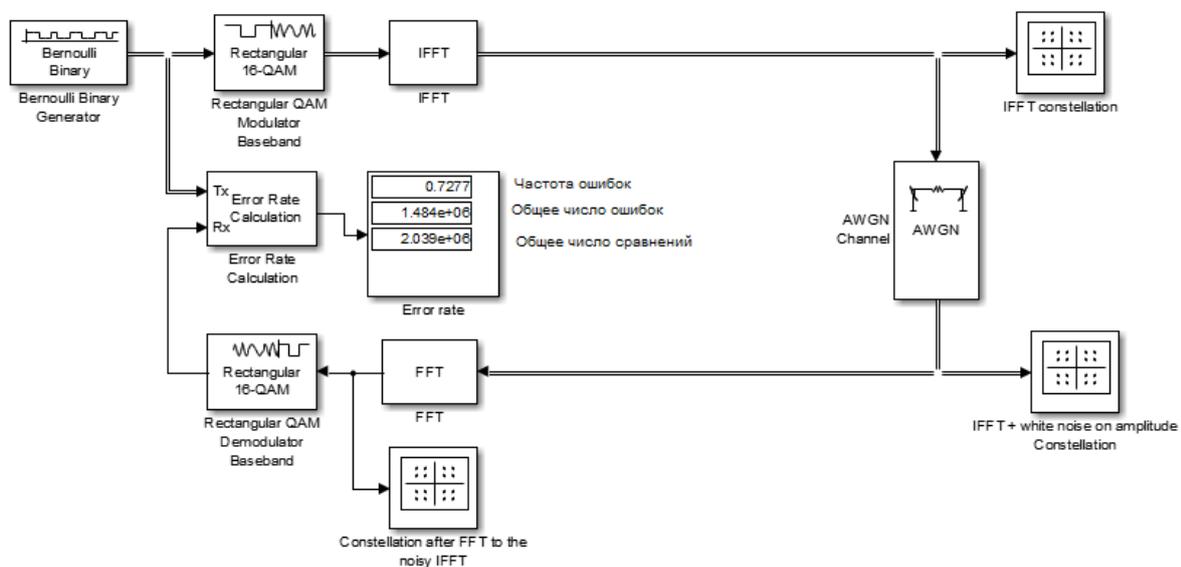


Рисунок 3.1 – Схема исследования системы OFDM

В работе использованы следующие блоки:

- 1) Bernoulli Binary Generator – генератор ПСП.
- 2) QAM – модулятор.
- 3) Блок обратного быстрого преобразования Фурье.
- 4) Блок AWGN (канал с шумом).
- 5) Блок QAM-демодулятора.
- 6) Блок подсчёта ошибок.

Настройки блоков представлены на рисунках 3.2 – 3.7.

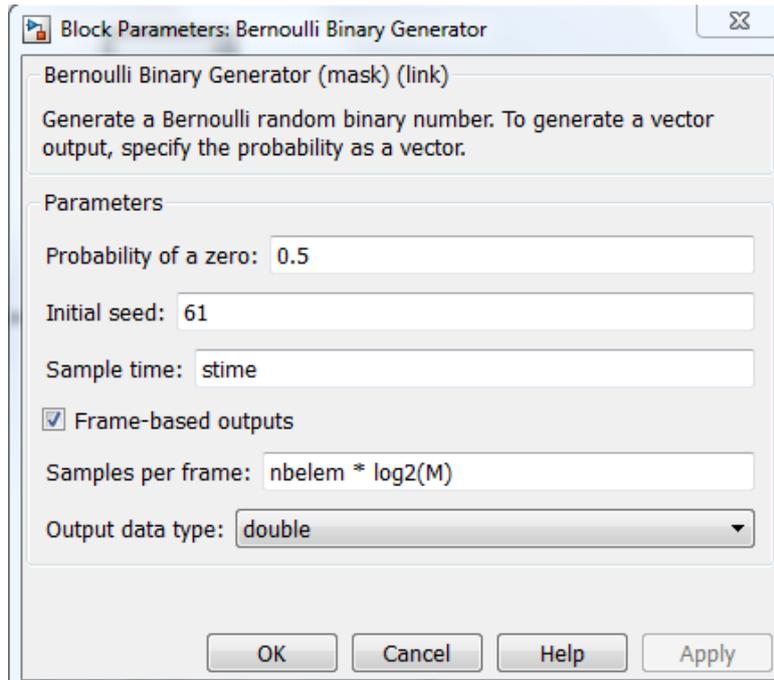


Рисунок 3.2 – Настройки блока генератора ПСП

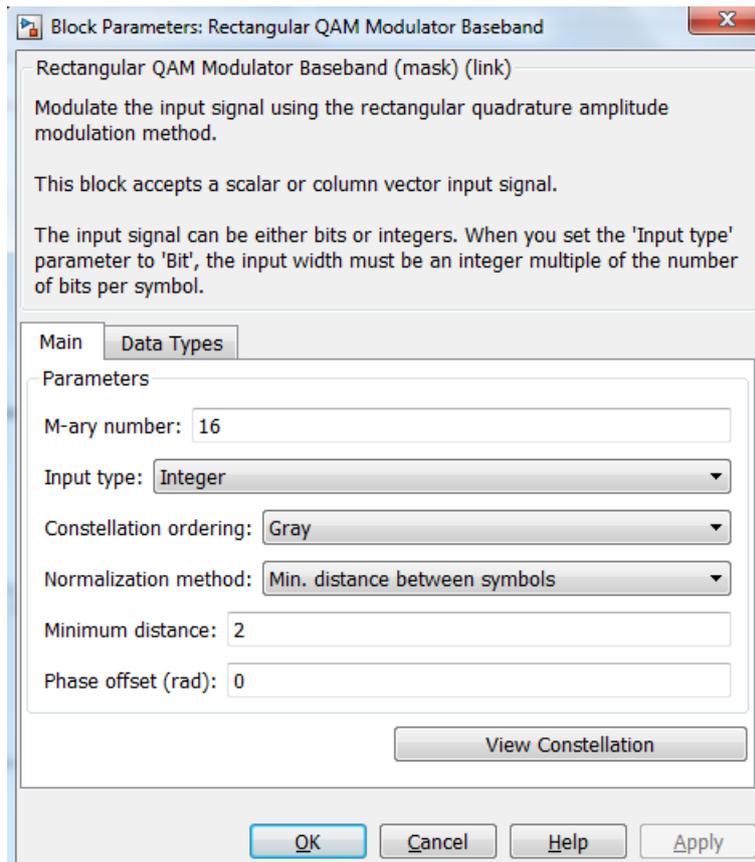


Рисунок 3.3 – Настройки QAM – модулятора.

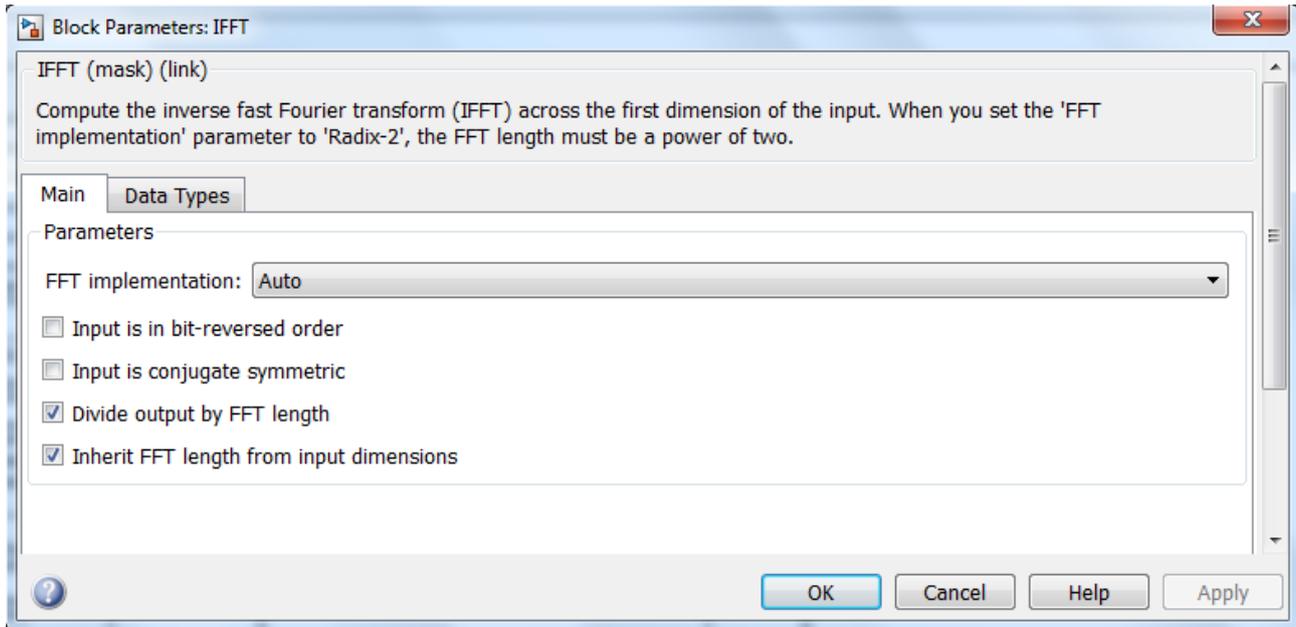


Рисунок 3.4 – Настройки блока преобразования Фурье

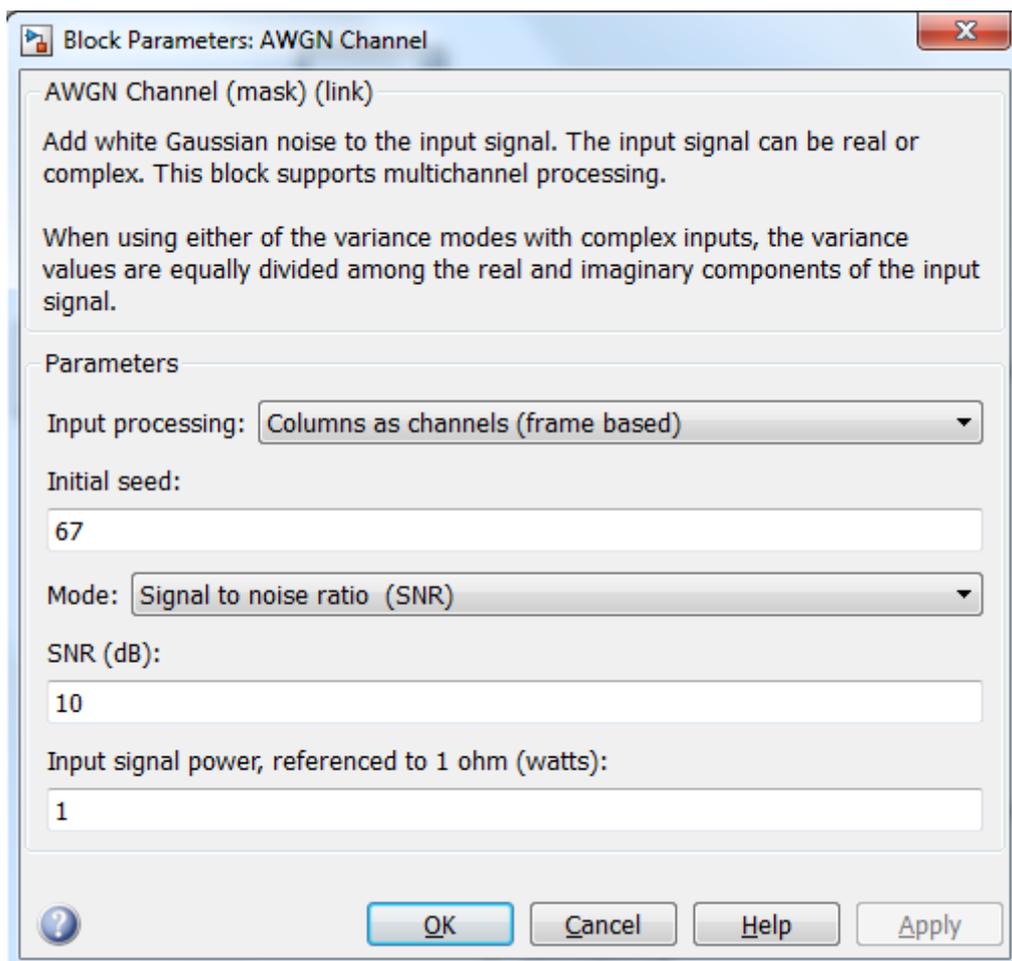


Рисунок 3.5 – Настройки блока канала с шумами

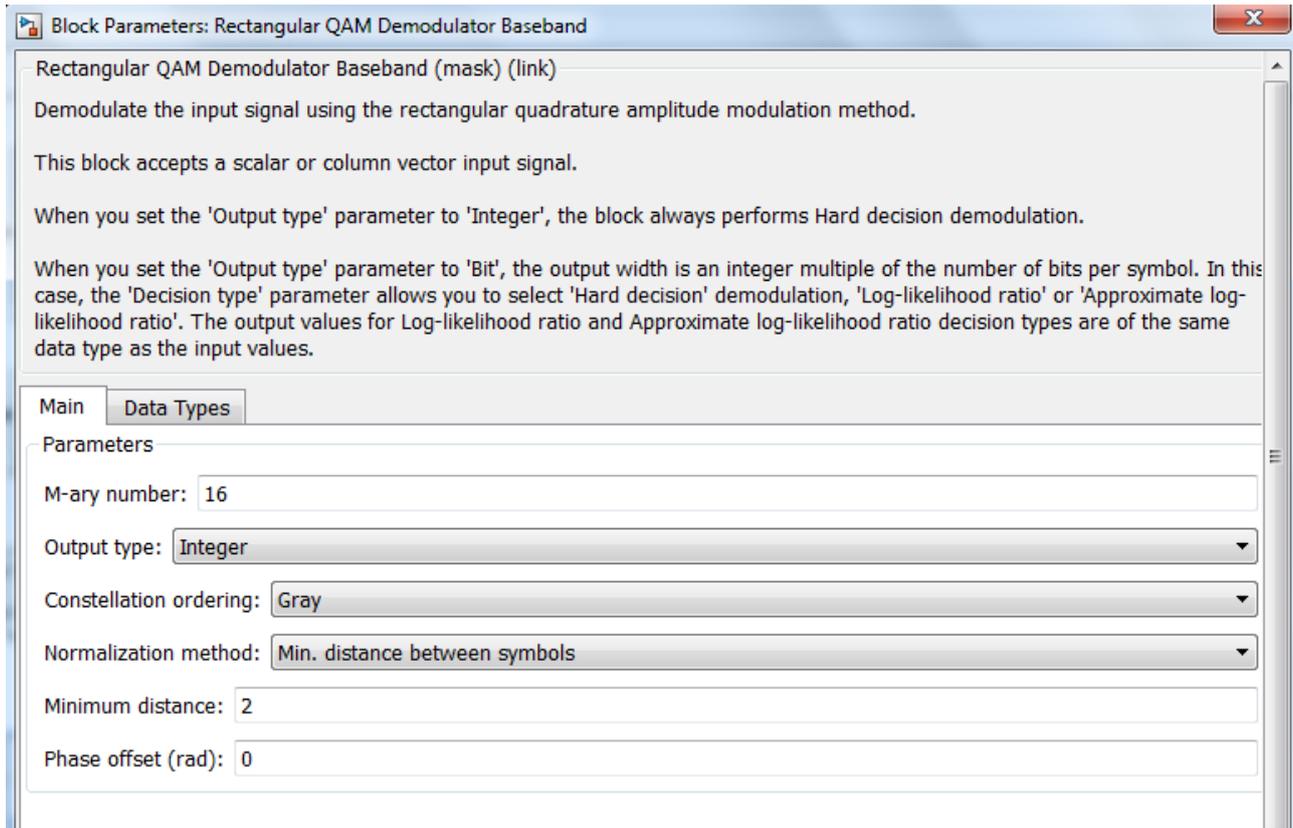


Рисунок 3.6 – Настройки QAM-демодулятора

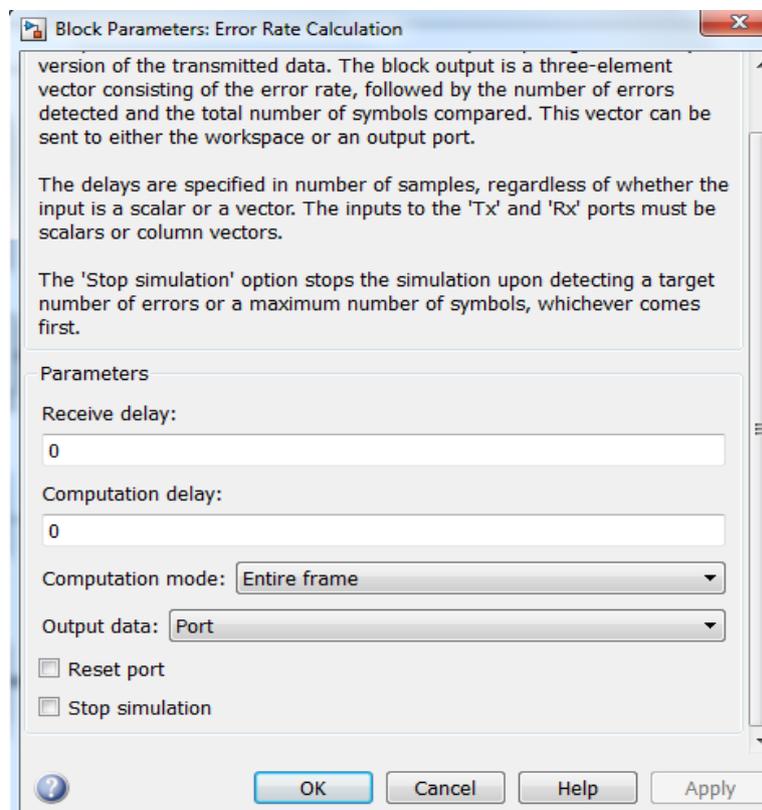


Рисунок 3.7 – Настройки блока подсчёта ошибок

Для построения зависимости частоты ошибок от вероятности нуля нужно в генераторе ПСП изменять значение «probability of a zero» от 0 до 1.

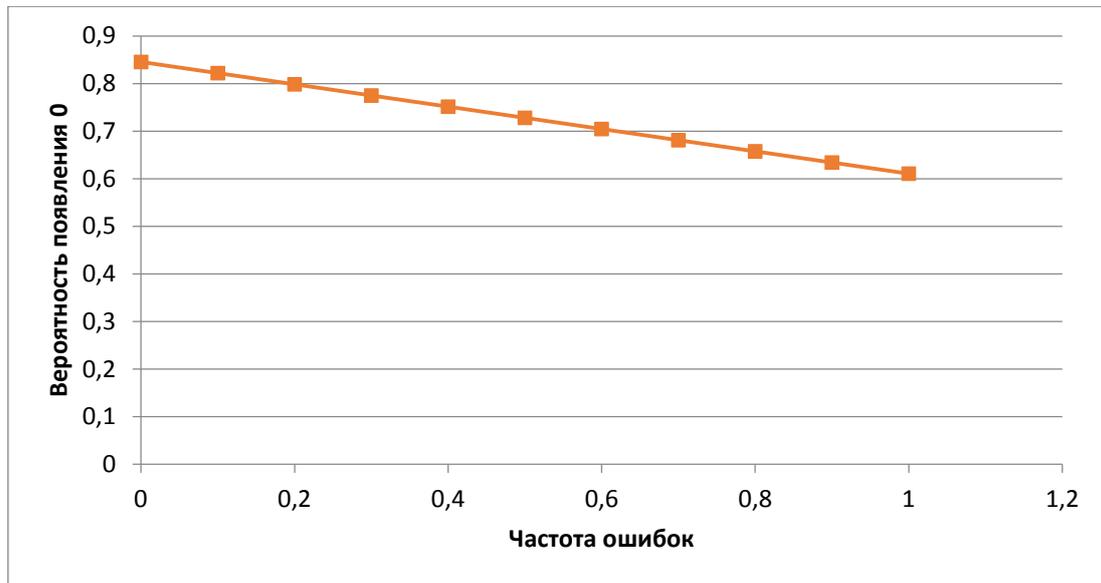


Рисунок 3.8 – Зависимость частоты ошибок от вероятности нуля

Для построения зависимости частоты ошибок от отношения сигнал/шум нужно в блоке канала с шумами изменять значение «SNR» от 0 дБ до 20 дБ.

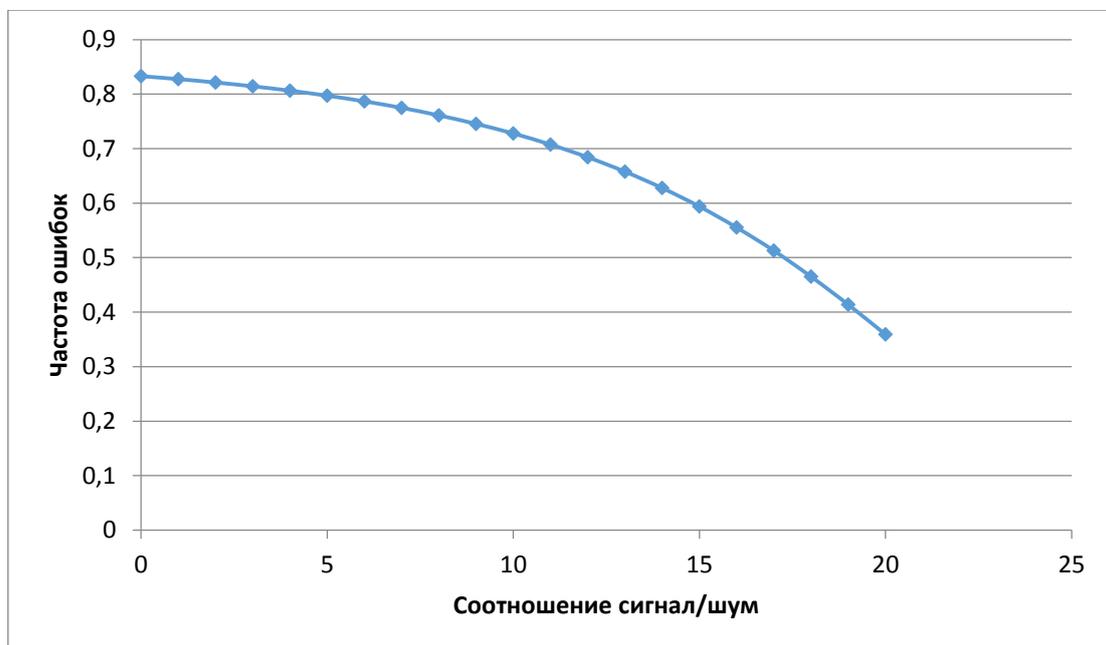


Рисунок 3.9 – Зависимость частоты ошибок от отношения сигнал/шум

На рисунках 3.10 – 3.12 представлены созвездия для различных значений отношения сигнал/шум:

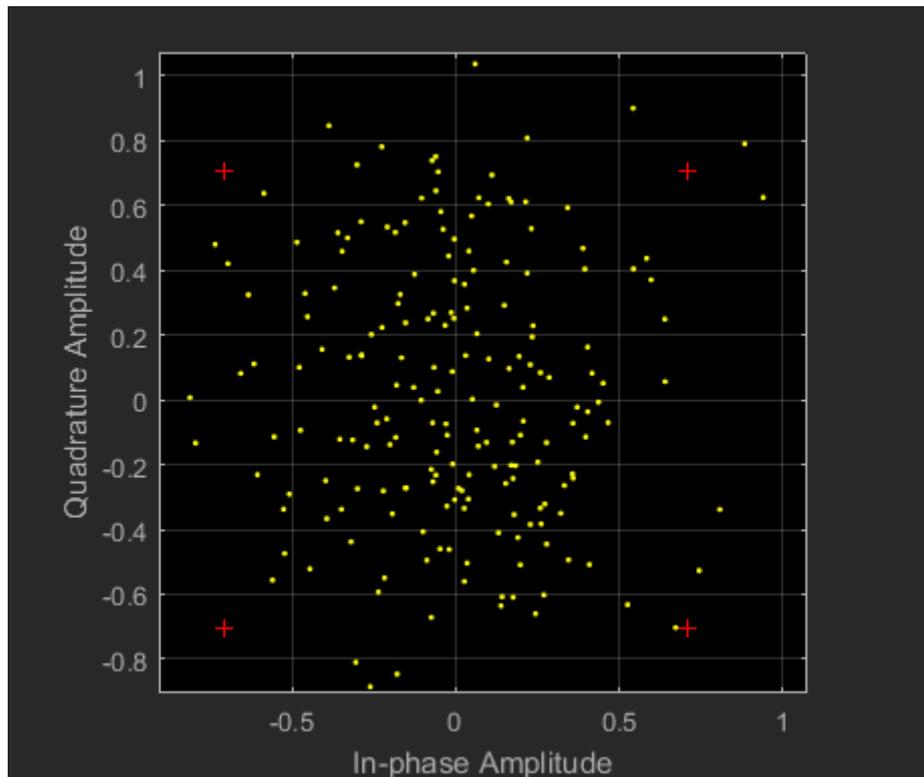


Рисунок 3.10 – Созвездие для значения отношения сигнал/шум 5 дБ

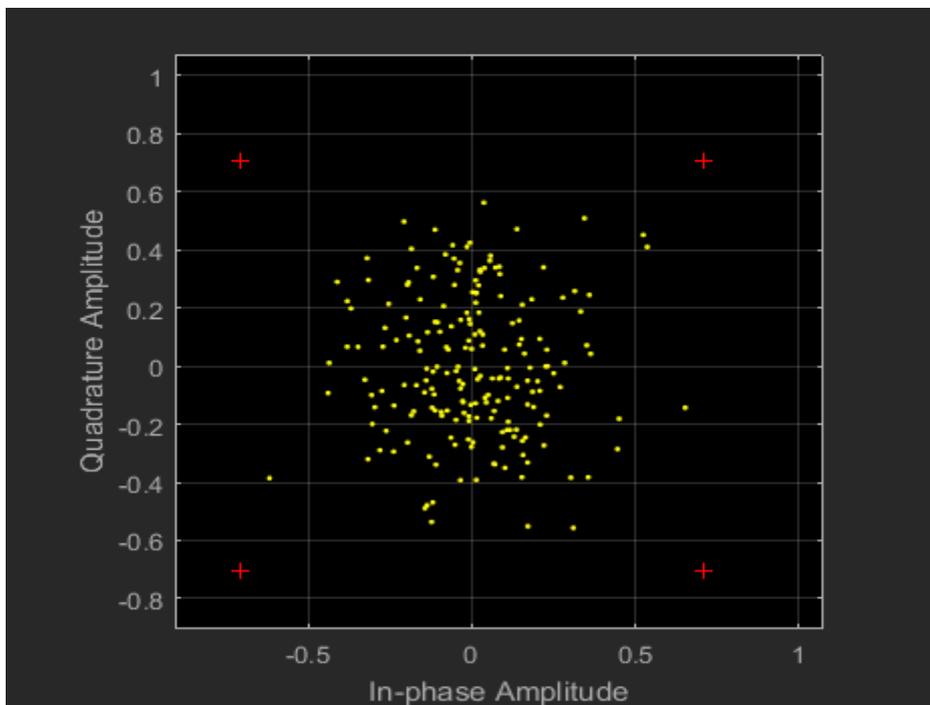


Рисунок 3.11 - Созвездие для значения отношения сигнал/шум 10 дБ

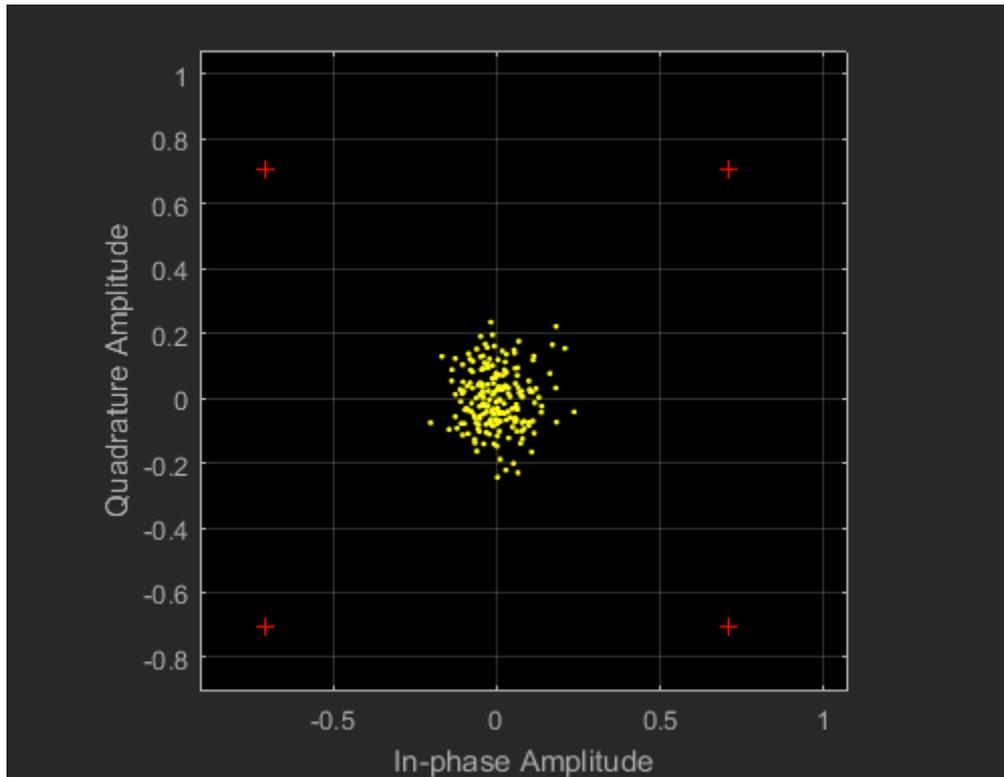


Рисунок 3.12 - Созвездие для значения отношения сигнал/шум 20 дБ

Для исследования MIMO:

1. Изменяя SNR, dB (signal noise rate) в блоке Model Parameters от 0 до 30 с шагом 5, снять зависимость FER (частоты ошибок в кадре) от SNR. Построить график для адаптивного случая MIMO. Зафиксировать характеристики сигнала из блока Signal Visualization (двойной щелчок, рисунок 3.16).

Справка. В адаптивном случае система автоматически подстраивается под условия в канале под заданное в блоке Model Parameters значение FER. Для включения адаптивного случая в блоке Adaptive Control Panel нужно выставить переключатели в соответствующие положения.

2. Перевести переключатели в блоке Adaptive Control Panel в положения, соответствующие ручному вводу количества антенн (рисунок 3.15).

Изменяя SNR, dB (signal noise rate) в блоке Model Parameters от 0 до 30 с шагом 5, снять зависимость FER (частоты ошибок в кадре) от SNR. Построить график. Зафиксировать характеристики сигнала из блока Signal Visualization.

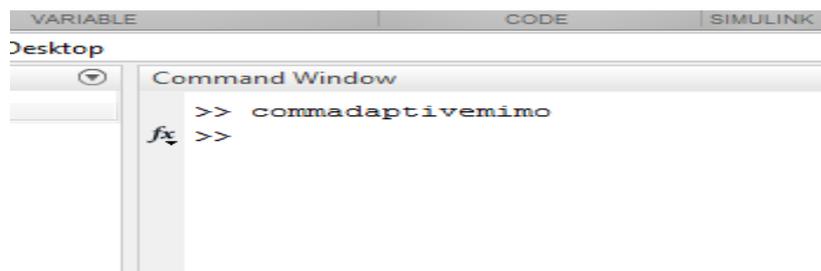


Рисунок 3.13 – Команда для создания схемы исследования MIMO

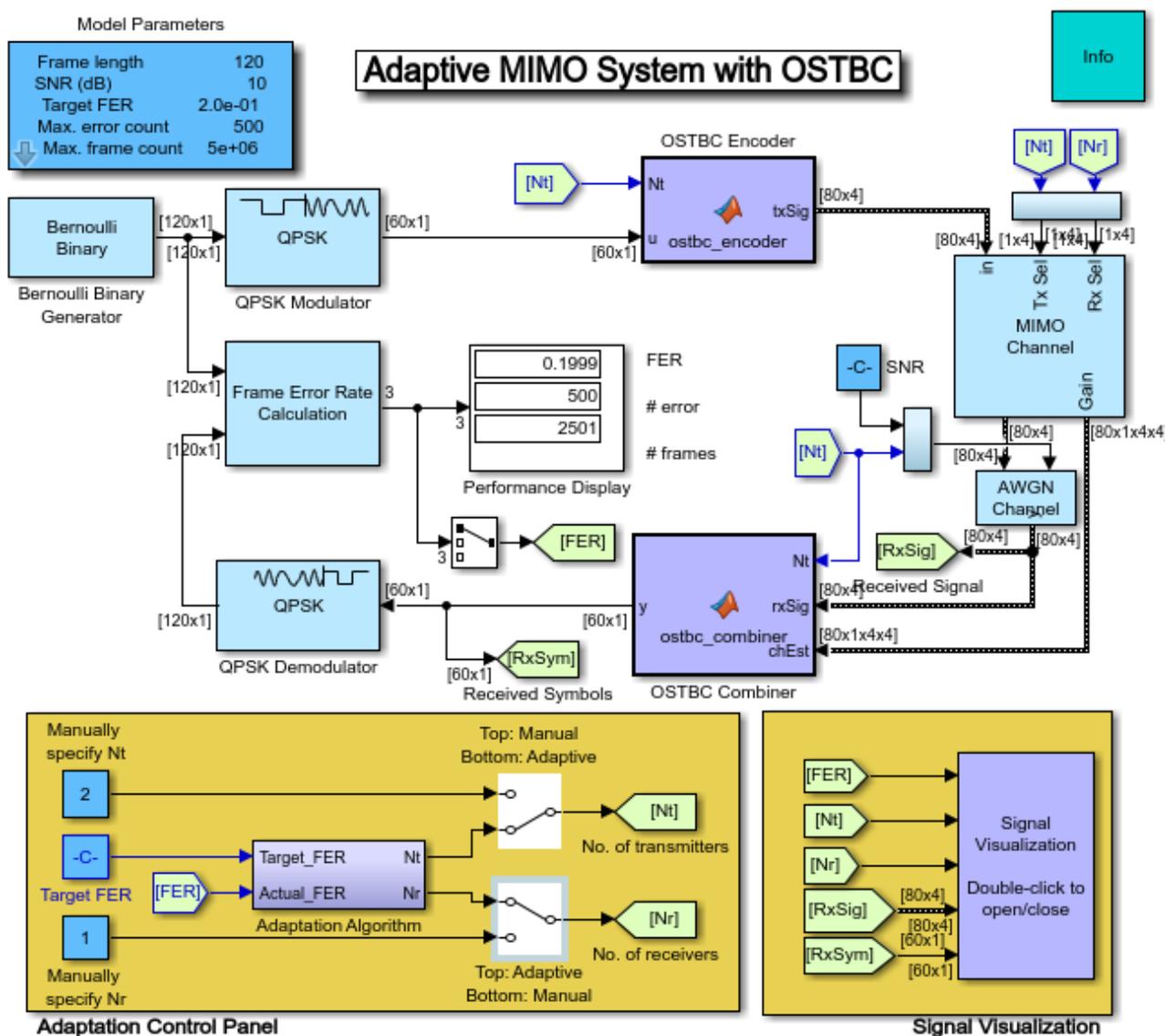


Рисунок 3.14 – Схема для исследования ММО

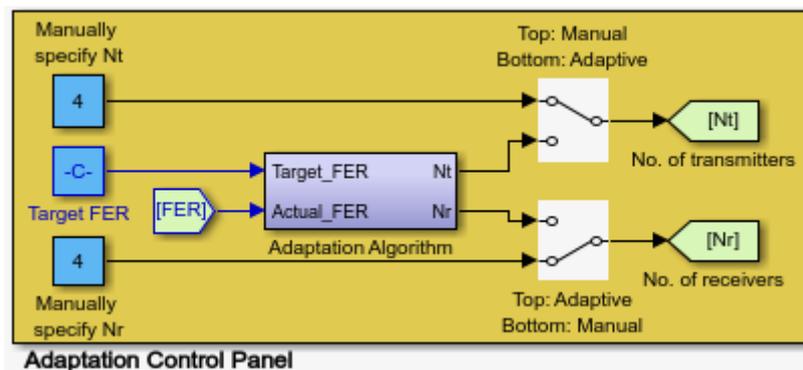


Рисунок 3.15 – Настройка блока Adaptation Control Panel для исследования случая ММО 4x4

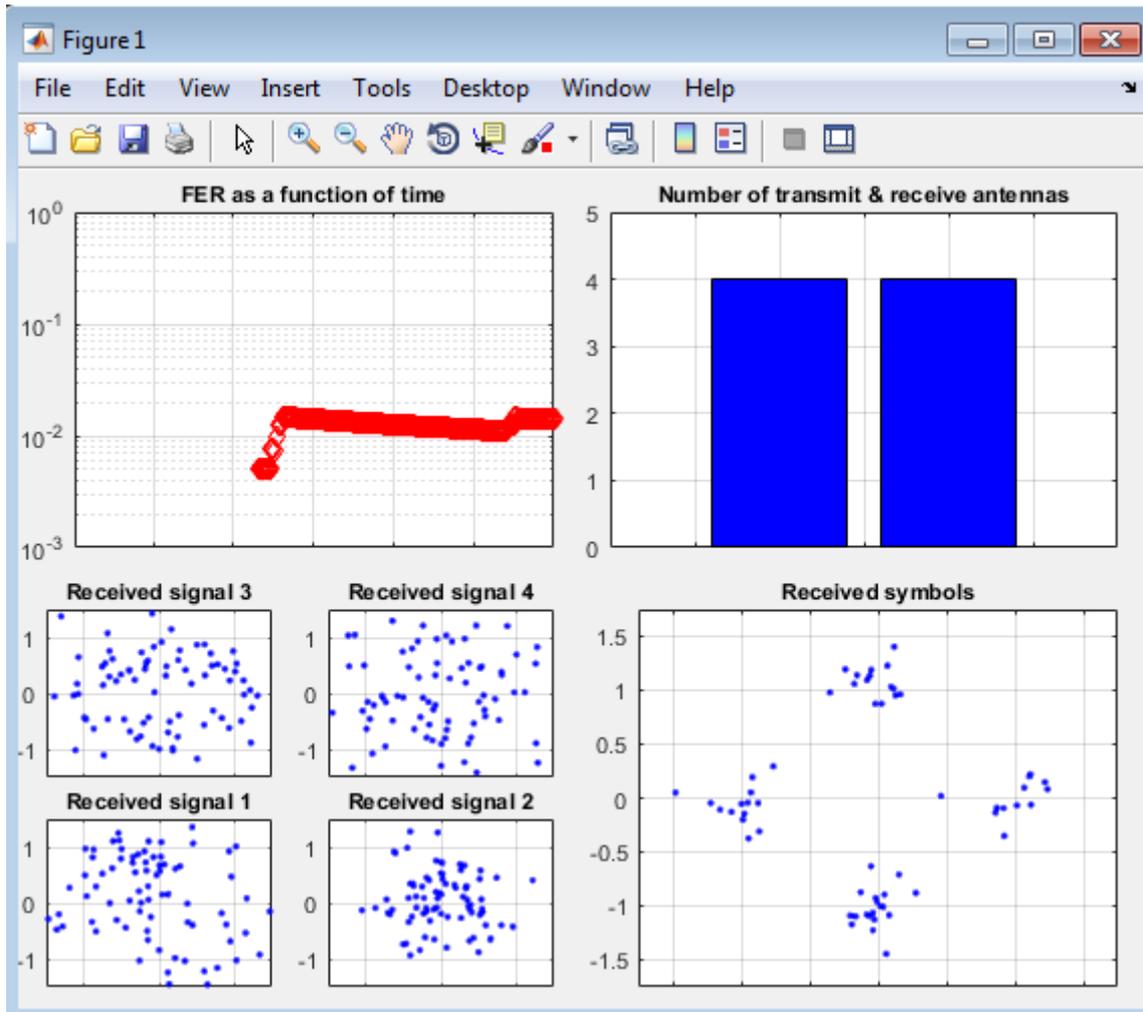


Рисунок 3.16 – Пример работы блока Signal Visualization

Проведем эксперимент, изменяя кол-во приемно-передающих антенн и соотношение сигнал/шум, снимем зависимость появления ошибки в кадре от перечисленных выше параметров. Результаты исследования приведены на рисунке 3.17.

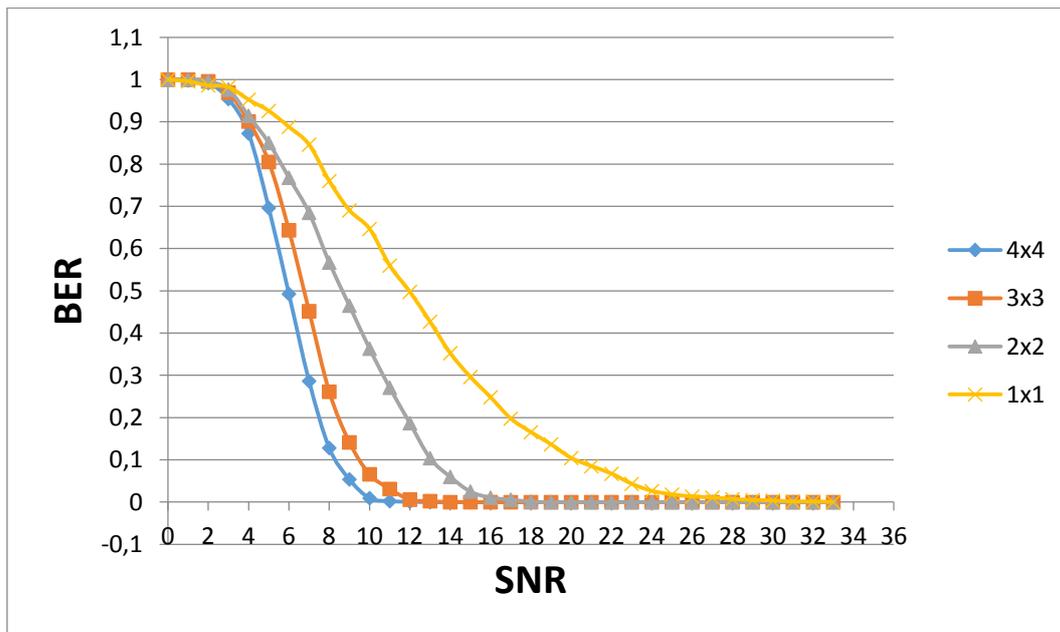


Рисунок 3.17 – Зависимость вероятности появления ошибки(BER) от соотношения сигнал шум(SNR)

Из рисунка 3.17 видно, что при увеличении количества приемных и передающих антенн помехоустойчивость значительно увеличивается.

Далее переведем систему в адаптивный режим, при котором система будет автоматически подстраиваться под заданные параметры в блоке Model Parameters. На рисунке 3.18 приведены результаты исследования зависимости появления ошибки в кадре от соотношения сигнал/шум, при адаптивном режиме.

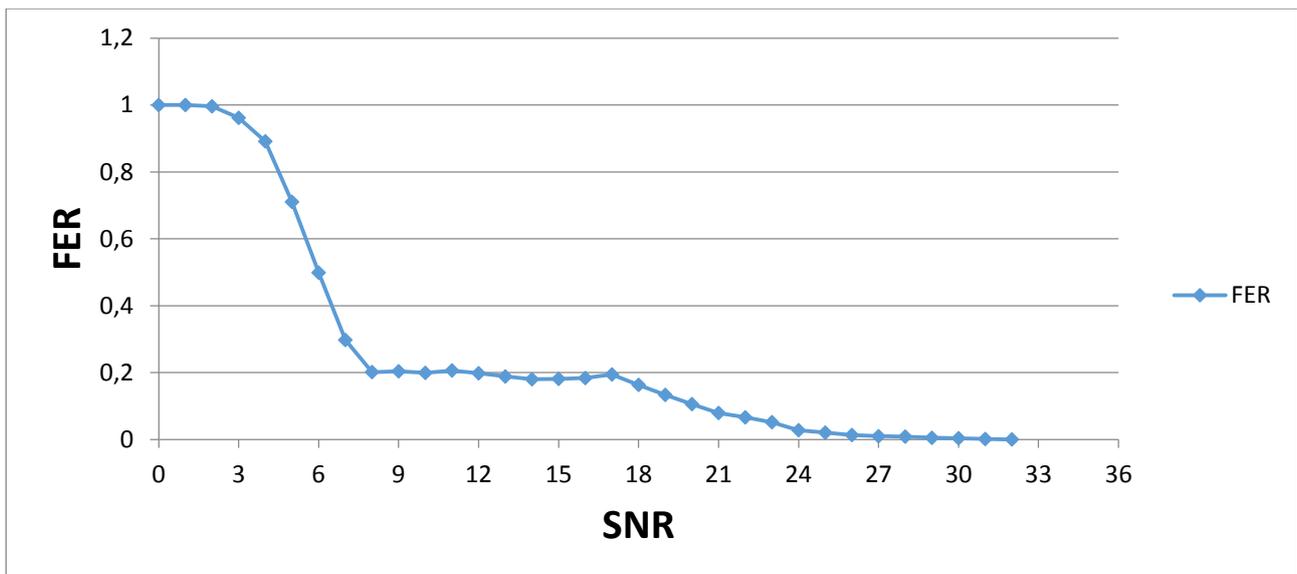


Рисунок 3.18 – Зависимость вероятности появления ошибки(FER) SNR в адаптивном режиме

Заключение

В ходе данной работы были исследован аппаратно-программный комплекс визуализации и исследования схем OFDM и MIMO модуляторов и демодуляторов.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что оценка канала совместно с использованием технологии OFDM-MIMO позволяет значительно улучшить качество передачи в многолучевом канале с замираниями.

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.