

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ИКТ

_____ С.Н. Даровских

« ____ » _____ 2020г.

**Моделирование приемопередающих устройств телекоммуникационных
систем, использующих технологию ММО**
ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – Д 11.03.02.2020.453.00. ПЗ (ВКР)

Руководитель работы, доцент
Спицын В.С. _____

« ____ » _____ 2020г.

Автор работы
студент группы КЭ-411
Беляева Н.И. _____

« ____ » _____ 2020г.

Нормоконтролёр
Спицына В.Д. _____

« ____ » _____ 2020г.

Челябинск 2020

РЕФЕРАТ

Беляева Н.И. Моделирование приемопередающих устройств телекоммуникационных систем, использующих технологию ММО. – Челябинск: ЮУрГУ, ИКТ, 2020, 41 стр., 18 ил., библиогр. список 9 – наим.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка модели приемопередающего устройства телекоммуникационных систем, использующую технологию ММО. В работе исследуется помехоустойчивость канала связи с использованием SISO- и ММО-систем. Моделирование алгоритмов проводилось для системы ММО с двумя передающими и приемными антеннами с релейскими замираниями при различных типах модуляции с целью повышения помехоустойчивости в радиоканале связи путем перемежения данных с использованием принципа кодирования Аламути. Реализация модели осуществлена в среде Simulink на основе пакета прикладных программ MATLAB.

					ЮУрГУ-Д.11.03.02.2020.453.00. ПЗ ВКР							
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>								
<i>Разраб.</i>	<i>Беляева Н.И.</i>				Моделирование приемопередающих устройств телекоммуникационных систем, использующих технологию ММО			<i>Литера</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>		
<i>Пров.</i>	<i>Спицын В.С.</i>							<i>Д</i>		3		
<i>Реценз</i>								ЮУрГУ кафедра ИКТ				
<i>Н.Контр.</i>	<i>Спицына В.Д.</i>											
<i>Утв.</i>	<i>Даровских С.Н.</i>											

ОГЛАВЛЕНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Обзор технологии МІМО	8
1.1 Беспроводная связь МІМО.....	8
1.1.1 Обобщённая структурная схема телекоммуникационной системы связи .	9
1.1.2 Беспроводной канал связи	11
1.2 Технология МІМО.....	14
1.2.1 Типы технологии МІМО.....	17
1.2.2 Применение системы МІМО.....	21
2 Имитационное моделирование технологии МІМО	24
2.1 Среда моделирования MATLAB	24
2.2 Иммитационная модель	29
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	41

СОКРАЩЕНИЯ

MIMO - Multiple Input Multiple Output;

SISO - Single Input Single Output;

SIMO - Single Input Multiple Output;

MISO - Multiple Input Single Output;

LAN - Local Area Network;

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access;

SDMA -Space Division Multiple Access;

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers;

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing;

CDMA -Code Division Multiple Access;

АБГШ - Аддитивный Белый Гауссовский Шум;

ЦАП - Цифро-аналоговый преобразователь;

АЦП - Аналого-цифровой преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная связь является одной из самых быстро развивающихся технологий в наше время. Потребность в высокоскоростных соединениях, обеспечивающих высокий показатель уровня шума и отказоустойчивости, возрастает с каждым годом. Этому способствуют такие услуги, как голосовая связь через Интернет (VoIP), видеоконференции и другие. На момент появления этих услуг не существовало беспроводных технологий, отвечающих этим требованиям, а существующие не обеспечивали абонентам высокое качество обслуживания на границе зоны покрытия, так как доступная скорость передачи данных быстро снижается с удалением абонента от базовой станции. В то же время и снижается качество связи, что в конечном итоге приводит к невозможности предоставления услуг в режиме реального времени с высоким качеством на всей территории покрытия сети. Действительно, тема беспроводной связи представляет собой много проблем для разработчиков, которые возникают в результате требований к природе физической среды и сложности в разработке базовой сети.

Популярной технической проблемой в беспроводной связи является наличие многолучевых индустриальных замираний, а именно случайных флуктуаций коэффициента усиления канала, возникающих вследствие рассеяния передаваемых сигналов от промежуточных объектов между передатчиком и приёмником. Поэтому многолучевое распространение сигнала обычно рассматривается как нарушение беспроводной связи. Эффективным способом решения проблемы многолучевого распространения есть использование адаптивных антенных массивов с несколькими антенными элементами. Системы связи, использующие такие антенны, называются множественными входами и выходами (MultipleInputMultipleOutput - MIMO). С момента появления нескольких ключевых идей в этой области в середине 1990-х годов, системы MIMO были одним из самых активных направлений исследований и разработок в

широкой области беспроводной связи. В этой области был проделан огромный объем работы, что привело к появлению большого числа непосредственных приложений и будущих возможностей. Системы MIMO значительно повышают пропускную способность сети за счёт пространственного разделения каналов, а также обеспечивают энергетический выигрыш за счет использования пространственно-временных кодов. С увеличением количества передающих и принимающих антенн полоса пропускания системы MIMO увеличивается почти пропорционально росту количества антенн, увеличение каналов связи можно использовать для того чтобы создать множество параллельных связей для передачи, и таким образом улучшить надежность системы.

В многолучевых каналах, разнообразие антенн является практичным, эффективным средствами, и поэтому широко используется для уменьшения эффекта затухания из-за многолучевого распространения сигнала. Классическим подходом является использование нескольких антенн на приеме, их комбинация или выбор и переключение для улучшения качества принимаемого сигнала. Наиболее важной проблемой при использовании приемных антенн является стоимость, размер и мощность удаленных устройств. Использование нескольких антенн и сложных радиоканалов делает удаленные устройства более крупными и дорогостоящими. В результате, технология разнесенного приема в большинстве случаев используется в базовых станциях для улучшения качества приема. Базовая станция часто обслуживает сотни и тысячи удаленных устройств. Таким образом, добавление оборудования к базовой станции более экономично, чем к удаленным устройствам. По этой причине схемы разнесения передач представляют большой интерес. Например, одна антенна и одна схема передачи при добавлении к базовой станции могут улучшить прием всех удаленных устройств в зоне покрытия. Альтернативой является добавление антенн ко всем удаленным устройствам. Первое решение, безусловно, более экономично.

1 Обзор технологии ММО

1.1 Беспроводная связь ММО

В современном обществе использование средств связи уже давно стало обычным и привычным делом. В то же время сложность систем связи постоянно возрастает, но их основные конструктивные и эксплуатационные принципы остаются неизменными на протяжении достаточно длительного времени. Воспроизведение сообщения, переданного на принимающую сторону с минимальным количеством ошибок, является основной целью систем коммуникации. Передатчик посылает сигналы, которые обрабатываются таким образом, чтобы их можно было восстановить в приемнике. Приемник может улучшить качество принимаемого сигнала путем обработки сигнала, то есть отфильтровывать проникающие помехи, удалять мешающие сигналы и бороться с другими факторами, ухудшающими свойства канала, тем самым улучшая качество принимаемых сообщений. Полученные и обработанные данные из передатчика передаются по каналу связи. Канал вносит определенные изменения, может исказить сигнал, добавлять шумы и помехи, приводить к задержке сигнала во времени, а также вызывать межсимвольные помехи и ослаблять мощность сигнала. Приемник должен корректировать как можно больше изменений, а выходные данные в результате обработки должны быть очень близки к исходным данным.

Для всех систем связи существует два конструктивных параметра, которые должны быть оптимизированы: спектральная эффективность и энергетическая эффективность. Спектральная эффективность системы связи представляет собой отношение скорости передачи информации к ширине полосы пропускания. Эта величина характеризует, насколько эффективно в произвольной системе связи используется полоса частот и имеет единицу измерения [бит/с/Гц]. При прочих равных условиях, чем выше спектральная эффективность, тем эффективнее используется частотный ресурс. Энергетическая эффективность характеризует энергию, которую необходимо затратить для передачи информации с заданной

вероятностью ошибки. Нынешние исследования в области беспроводных телекоммуникационных системах связи связаны с оптимизацией этих двух параметров.

1.1.1 Обобщённая структурная схема телекоммуникационной системы связи

Структурная схема телекоммуникационной системы связи представлена на рисунке 1.1.

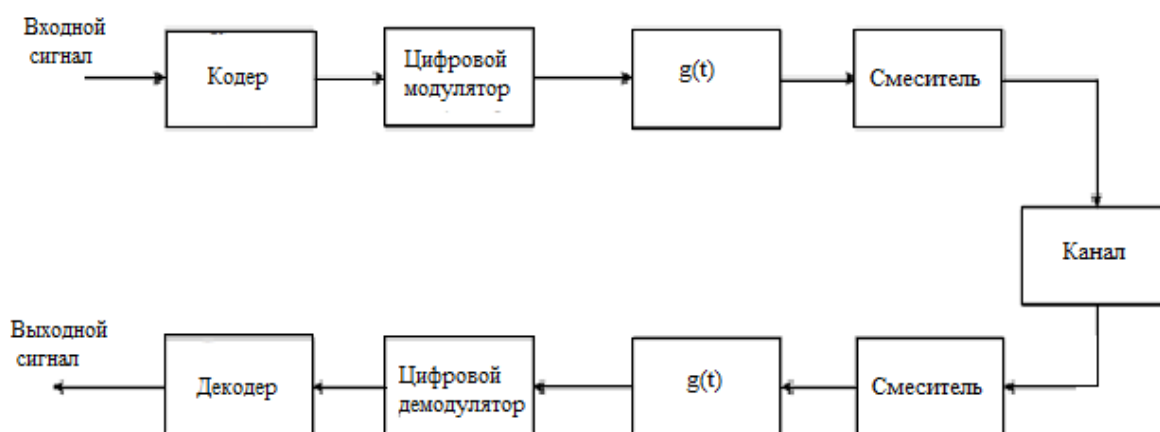


Рисунок 1.1 – Обобщённая структурная схема телекоммуникационной системы связи

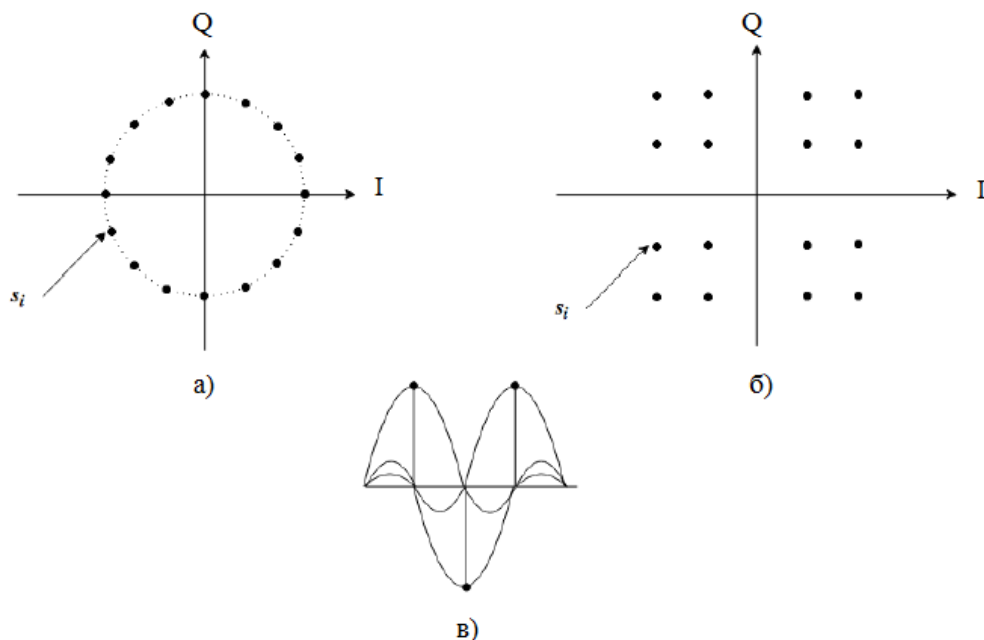
Передатчик принимает сигнал, и кодер преобразует этот сигнал в цифровой поток, это нужно для того, что бы преодолеть шумы и помехи, возникающие при прохождении сигнала через канал. Затем кодер канала добавляет избыточность, то есть дополнительные биты к битовой последовательности для обнаружения или исправления ошибок в приемнике.

Модулятор заменяет битовую последовательность дискретными сигналами. Существует множественное количество возможных типов модуляции, два наиболее популярных показаны на рисунке 1.2 (а) и рисунке 1.2 (б). Символы (S_i) представлены в двумерном символьном пространстве на ортогональной основе, выраженной с помощью синфазной и квадратурной составляющих. Представление символов в комплексной форме очень удобно, в передатчике

синфазная и квадратурная части разделяются перед обработкой сигнала и окончательно смешиваются с несущей частотой, но со смещением по фазе на 90 градусов. Этот фазовый сдвиг на несущей частоте достигается с помощью ортогонального базиса, выраженного комплексными числами. Фильтр формирования импульсов обозначается как $g(t)$, который формирует последовательность импульсов, и он соответствует последовательности импульсов Найквиста. Если время между символами обозначается как период передачи символа (T_s), то импульс Найквиста должен удовлетворять соотношению для целого числа N :

$$g(NT_s) = \begin{cases} 1, & \text{если } N = 0, \\ 0, & \text{если } N \neq 0. \end{cases}$$

другими словами, импульс имеет характеристическое значение только в некоторый момент отсчета, которое отличное от нуля и нулевые значения во всех остальных отсчетных точках. На рисунке 1.2 (в) показана сформированная формирующим фильтром Найквиста последовательность из трех символов.



- а) шестнадцатеричная фазовая модуляция (16-PSK);
- б) квадратурная амплитудная модуляция (16-QAM);
- в) формирующий фильтр

Рисунок 1.2

После того как сигнал проходит через фильтр формирующий импульсы в передатчике, он становится аналоговым с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП), это преобразование происходит с помощью смесителя. Смеситель является неотъемлемой частью большинства беспроводных систем. Для эффективного использования имеющегося спектра сигнал предварительно преобразуется с увеличением частоты в выделенной полосе частот для дальнейшего использования. В приёмнике сигнал преобразуется обратно с более низкой частотой с помощью смесителя, фильтруется в согласованном фильтре для минимизации шума, далее квантуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Затем проходит через демодулятор и следует через декодер, который проводит декодирование последовательности символов. Наконец, приемник воздействует на полученные данные, к примеру, воспроизводит речевой сигнал.

1.1.2 Беспроводной канал связи

Канал - это путь, по которому проходит электрический сигнал от передатчика к приемнику. Беспроводные каналы гораздо сложнее, чем проводные, так как они очень чувствительны к помехам. С точки зрения обработки сигналов, канал может вводить шумы и другие посторонние сигналы, такие как межсимвольная интерференция и замирания в принимаемом сигнале. Эти эффекты будут рассмотрены далее.

Шумы

Аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) – это базовая модель шума анализа радиосигнала, используемая для имитации многих случайных процессов, происходящих в природе. АБГШ аддитивный, это означает, что он складывается с полезным сигналом. Он белый, так как он имеет равномерную мощность на всей полосе частот. Он гауссовский, поскольку имеет нормальное распределение во временной области. Универсальным способом сравнения относительного количества сигнала и шума является отношение сигнал/шум (SNR), которое определяется по формуле:

$$SNR = \frac{E[|r(t)|^2]}{E[|n(t)|^2]} = \frac{E_c}{N_0 B t_c} = \frac{E_c}{N_0 B t_b},$$

где t_c – время передачи символа,

t_b – время передачи одного бит информации,

$N_0 B$ – мощность шума,

E_c и E_b – энергии символа и бита соответственно,

$r(t)$ – принятый сигнал и $n(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум.

Многолучевые замирания

Многолучевым замиранием является поступление передаваемого сигнала в предназначенный приемник через различные углы, временные задержки, частотные сдвиги за счет рассеяния электромагнитных волн в окружающей среде. Сигнал может отражаться от поверхностей, поэтому в среде распространения возникают несколько копий одного и того же сигнала, полученного приемником каждая из которых имеет свою собственную фазовую задержку. Эти различные копии сигнала могут складываться, что приводит как к положительным, так и к отрицательным последствиям.

Свойства канала в основном определяет окружающая среда, которая зачастую бывает очень нестабильной. Следовательно, принимаемая мощность сигнала колеблется в пространстве из-за углового разброса или по частоте из-за разброса задержки или по времени из-за доплеровского разброса через случайную суперпозицию многолучевых компонентов. Так же, отраженные сигналы могут мешать прямому лучу, который имеет самую высокую интенсивность. Пример многолучевого распространения радиосигнала можно увидеть на рисунке 1.3.

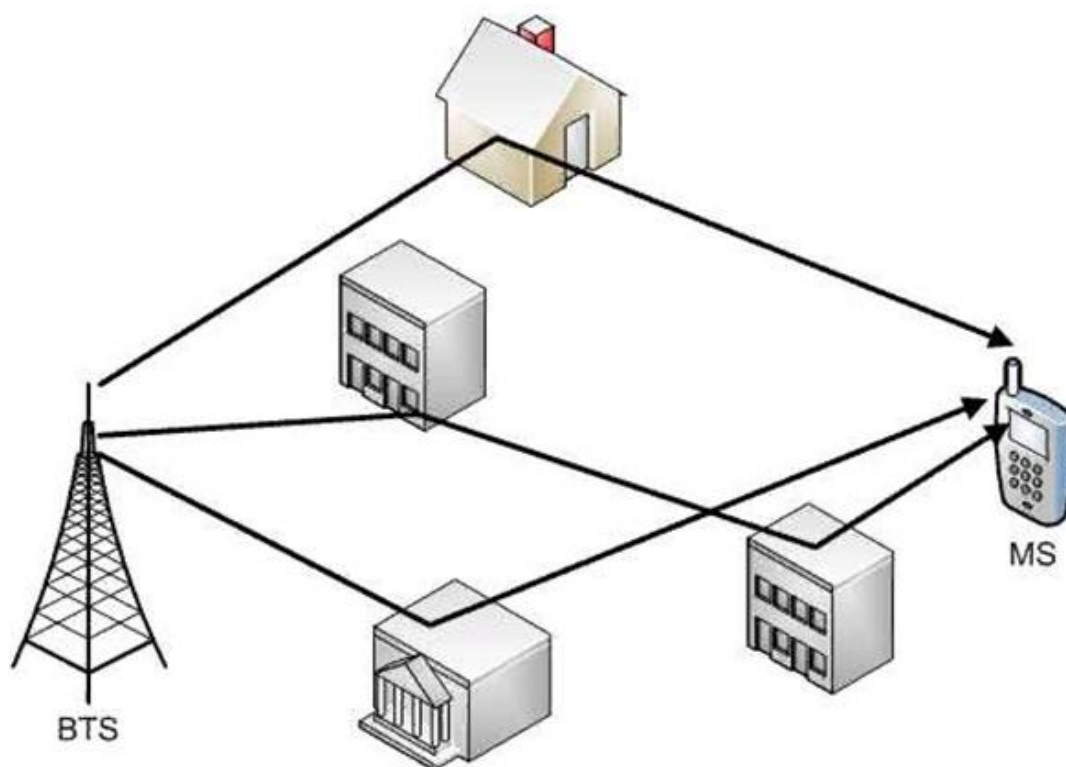


Рисунок 1.3 – Пример многолучевого распространения сигнала

Межсимвольная интерференция

Межсимвольная интерференция наблюдается, когда текущий принятый символ перекрывается и искажается окружающими символами. Такой эффект наблюдается как в проводных, так и в беспроводных системах передачи данных. Глядя на рисунок 1.2 (в), можно увидеть, что если один символ смещается во времени, то он начинает влиять на окружающие символы. Поскольку в многолучевой среде каждый символ может быть принят сразу в нескольких временных интервалах или смещен в пределах своего интервала, это означает, что межсимвольная интерференция может значительно ухудшить прием, если он не будет должным образом противодействовать. Основным методом борьбы с межсимвольной интерференцией является увеличение защитного интервала между символами, а так же управление диаграммой направленности. На рисунке 1.4 представлен пример межсимвольной интерференции сигналов приходящих с двух разных базовых станций.

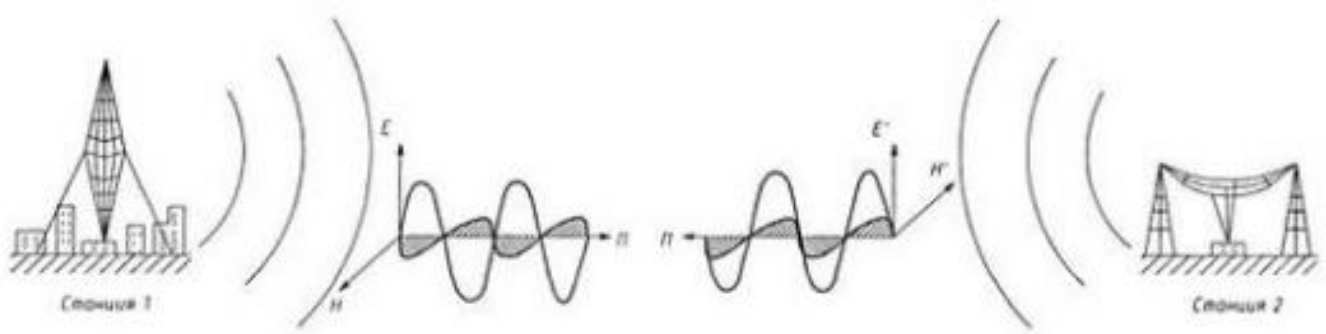


Рисунок 1.4 – Пример межсимвольной интерференции

Реальный канал с межсимвольной интерференцией учитывает образование разнесения радиосигнала с течением времени вследствие нелинейности частотно-фазовой характеристики канала, а также его узкой полосы пропускания. Например, при передаче дискретных сигналов по каналу значение выходного сигнала будет зависеть от реакции канала не только на передаваемый символ, но и на предыдущие или более поздние символы. В радиоканалах на формирование межсимвольных помех влияет многолучевое распространение сигналов.

1.2 Технология MIMO

На данный момент основополагающей проблемой беспроводных телекоммуникационных систем связи является улучшение качества обслуживания пользователей путем повышения скорости передачи информации, за счет уменьшения вероятности ошибочно переданных бит информации. Необходимость в увеличении пропускной способности из-за увеличения количества пользователей беспроводной сетью, а вследствие и передаваемой информации, становится весьма актуальной темой. Решение подобных проблем опираются на возможность расширения полосы частот и увеличением излучаемой мощности приёмопередатчиков. Но все же, расширить полосу частот довольно-таки трудоемкая задача, так как частотные диапазоны практически недоступны из-за их стоимости.

Уменьшить вероятность ошибочно переданных бит позволяет разнесенный прием. Такой метод передачи информации можно обеспечить путем передачи и приема данных несколькими антеннами сразу. На сегодняшний день в системах передачи дискретных сообщений используется технология с множественным входом и множественным выходом, благодаря которой можно легко улучшить качественные показатели систем связи в целом. Технология MIMO значительно повышает пропускную способность, скорость передачи данных и спектральную эффективность системы с помощью установленных антенных решеток на концах линии связи. В такой системе передача информации от приемной и передающей антенны происходит по собственному каналу передачи. При передаче по двум каналам MIMO, одну и ту же предварительно закодированную информацию можно восстановить на приёмной стороне, что позволяет улучшить отношение сигнал/шум.

Существует несколько основных конфигураций систем беспроводной связи: SingleInputSingleOutput - SISO (один вход, один выход), SingleInputMultipleOutput - SIMO (один вход, несколько выходов), MultipleInputSingleOutput - MISO (несколько входов, один выход) и MIMO (несколько входов, несколько выходов). В таких системах можно утверждать, что пропорционально числу антенн на приемной и передающей сторонах увеличивается и скорость передачи информации. Чаще всего используют равное количество антенн, что позволяет добиться высокой скорости передачи данных. Количеству антенн и их каналов связи соответствует число приходящих потоков данных, так же каждое устройство оснащено сумматором, с помощью которого возможна обработка и извлечение информации из общего потока данных. За счет совместного разнесения данных вероятность битовых ошибок уменьшается. Скорость передачи данных так же можно увеличить путем использования пространственного кодирования данных. Пространственная обработка сигналов позволяет формировать несколько параллельных информационных потоков. С увеличением количества информационных потоков способствует увеличению

скорости передачи данных, но при фиксированном значении излучаемой мощности вероятность ошибки начинает так же увеличиваться. Данная технология сложна в своей реализации. Для беспроводных систем канал связи является основополагающим определением, необходимо понимать важность основных эффектов, таких, как потери в тракте передачи и затухания из-за многолучевых распространений, возникающих в нем. Так же необходимо гарантировать различия в каждом из каналов связи, для обеспечения устойчивой многопоточковой передачи в одном диапазоне частот. На рисунке 1.5 представлены различные типы конфигурации систем MIMO, где стрелками указаны пути распространения сигналов между приёмной и передающей антеннами. Как на приёмной, так и на передающей стороне возможное количество антенн не ограничено, на сегодняшний день популярна система разнесенной передачи с конфигурацией 64x64. Так же возможно использование систем с неравным количеством антенн.



Рисунок 1.5 – SISO, SIMO, MISO и MIMO конфигурации систем связи

1.2.1 Типы технологии MIMO

Особенность mimo-систем в том, что появляется возможность улучшить пропускную способность, а так же преодолевать нежелательные эффекты в канале связи, вызванные замираниями сигнала или многолучёвостью. Организация многопозиционных антенных систем различает несколько типов формирования многоантенных радиосистем, разберем каждый из них по отдельности.

Первый тип формирования радиосистем – это пространственное разделение каналов. Разделения каналов при таком типе происходит с помощью пространственно-временного блочного кодирования с интервалом задержки, что позволяет улучшить энергоэффективность путем повторной передачи данных. Так же возможно разделение каналов с пространственно-временного решётчатого кодирования. В зависимости от продолжительности распространения и особенностей канала связи, сигнал видоизменяется стремительно. С радиоприёмной стороны наблюдается многолучевое затухание, означающее, что уровень сигнала существенно ослаблен. Разнесённый приём позволяет разрешить эту трудность, поскольку повторения одних и тех же радиосигналов принимаются разными каналами, где затухания не аналогичны, а далее суммируются. Для примера разберем simo-систему. Технологию считают усовершенствованной в том случае, когда приемник оптимально объединяет сигналы от антенн таким образом, чтобы амплитуды каждого из них превышали амплитуду результирующего сигнала. Кратность разнесения – это определение, присущее каналу с затуханиями и указывающее на множество самостоятельных каналов.

Что касается simo-систем, то оно совпадает с количеством принимаемых антенн. Следует отметить, что разнесенный прием позволяет повысить главные параметры приёмопередачи лишь в том случае, если каналы коммуникаций независимы между собой. В ситуации с miso-системами кратность разнесения обусловлена количеством антенн на передающей стороне в независимых трактах с замиранием. При применении отдельно сформированных сигналов во время передачи или приёма реально достичь хороших результатов, даже без

необходимых данных о канале связи и, не задав требуемых настроек в радиопередатчике. Сегодня пространственно-временное кодирование широко эксплуатируется в телекоммуникационных технологиях связи, применяемых в многопозиционной радиопередаче. Так как возможность "корректного" воссоздания передаваемого сигнала увеличивается, поскольку идентичные данные передаются одновременно всеми антенными массивами, использующими как временное, так и пространственное кодирование. Структурная схема пространственно-временного кодирования для системы ММО 2x1 представлена на рисунке 1.6, где h_1, h_2 - канальные коэффициенты передачи данных; s_1, s_2 - символы передаваемой последовательности символов.

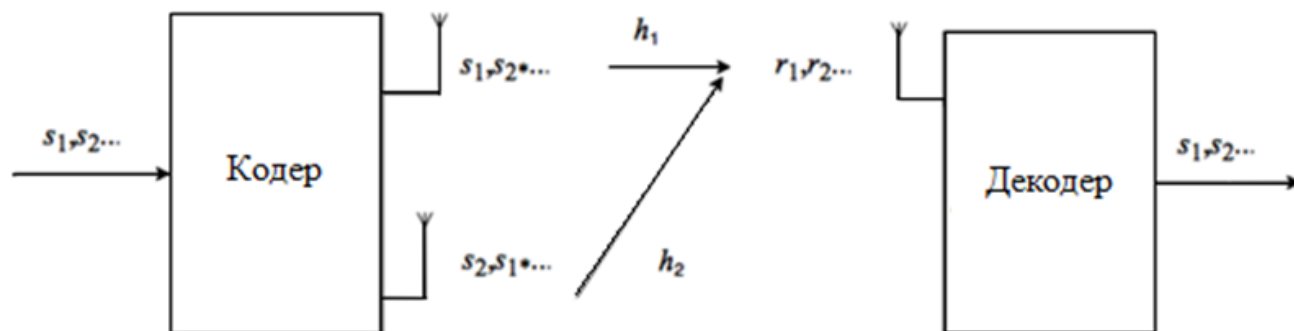


Рисунок 1.6 – Структурная схема пространственно-временного кодирования для системы ММО

Такая методика ориентирована на усиление качества принимаемых радиосигналов, а вовсе не на повышение скорости радиопередачи. Совмещение разнесенного радиоприема и разнесенной радиопередачи представляет собой систему ММО, где кратность разнесения, в сравнении с самостоятельными радиоканалами с затуханием между каждым приемными и передающими антеннами, обусловлена действием суммы количества принимающих и передающих антенн.

Пространственное мультиплексирование – это второй тип формирования многоантенных радиосистем. Здесь разные данные передаются через разные

антенны, что приводит к увеличению скорости передачи данных. Стоит заметить, что этот метод позволяет повысить скорости при использовании той же полосы частот и мощности, что и обычные системы с одной антенной для передачи и приема SISO. Данный метод применяется в технологии множественного доступа с пространственным разделением каналов SDMA. Тем не менее, если среда распространения не обладает многолучевыми свойствами, то пространственное мультиплексирование не увеличит скорость передачи информации. Межканальная корреляция приводит как к положительным эффектам, так и к отрицательным. При низких значениях корреляции обеспечивается многоантенная передача, тем самым это дает возможность легко восстановить данные. Обратным эффектом обладают низкие значения корреляции.

Пространственное мультиплексирование применяется в технологии множественного доступа с пространственным разделением каналов SDMA. Тем не менее, если среда распространения не обладает многолучевыми свойствами, пространственное мультиплексирование не увеличит скорость передачи информации.

Формированием диаграмм направленности является последний тип многоантенных радиосистем. В этом случае передающая сторона использует заранее определенные данные о канале связи. Одни и те же символы передаются на каждый тракт антенны вместе с комплексным коэффициентом амплитуды или фазы. Одновременная передача комбинации данных из двух символов будет передаваться лишь в том случае, когда диаграмма направленности оптимизирована на пространственное разнесение или мультиплексирование сигнала. Для формирования матрицы перемножения сигнал проходит предварительную фильтрацию и последующую коррекцию непосредственно в приемнике и передатчике. Построение такой матрицы диаграммы направленности возможно, если передающая сторона обладает информацией о свойствах радиоканала. Это позволяет получить оптимальную пропускную способность. На

рисунке 1.7 схематично продемонстрирована двухлучевая диаграмма направленности с темным и светлым лучами.

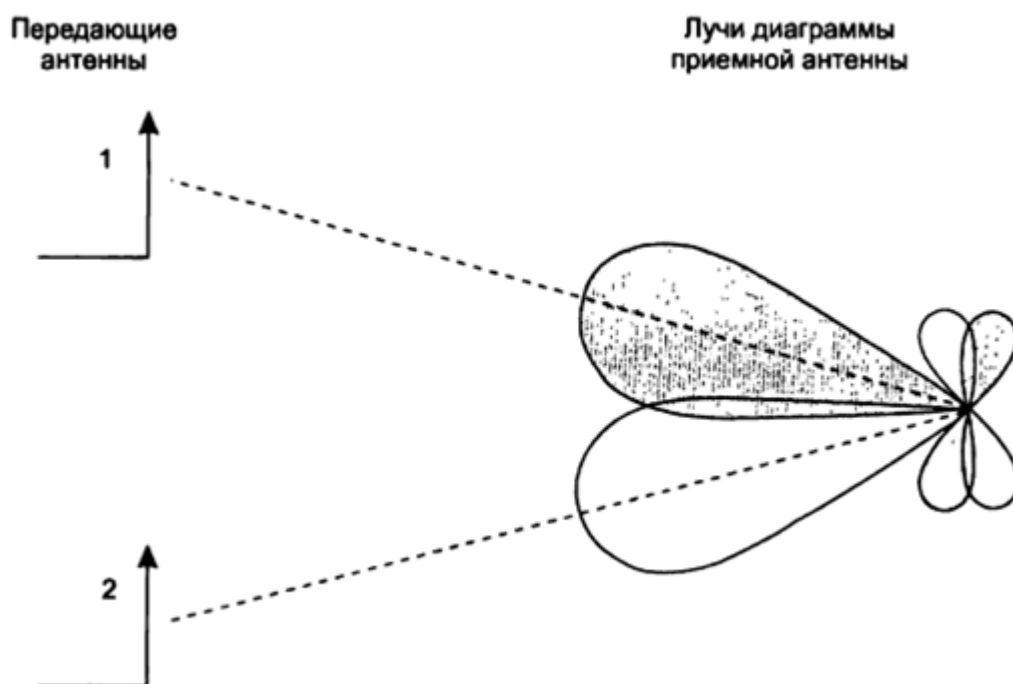


Рисунок 1.7 – Иллюстрация физического разделения пространственно разнесенных источников

Темный луч обеспечивает прием сигнала с первой передающей антенны и не принимает сигнал второй антенны. Светлый луч, наоборот, не принимает сигнал первой передающей антенны.

Совместное использование эффектов пространственного разнесения, пространственного мультиплексирования и формирования луча диаграммы направленности позволяет:

- повысить помехоустойчивость системы (уменьшить вероятность ошибки);
- повысить скорость передачи информации в системе;
- увеличить зону покрытия;
- уменьшить требуемую мощность передатчика.

Эти четыре положительных свойства систем ММО, к сожалению, не могут быть реализованы одновременно. Например, увеличение скорости передачи

информации приводит к увеличению вероятности ошибки или к увеличению излучаемой мощности передатчика. Поэтому при разработке конкретной системы связи необходимо находить компромисс.

1.2.2 Применение системы MIMO

Первые идеи в области MIMO - технологий были представлены в виде работ А.Р. Кея и А.Д. Джорджа (1970), так же были продемонстрированы в работах Ван Эттена (1975, 1976). В 1984 и 1986 годах Джек Уинтерс и Джек Зальц из BellLabs опубликовали ряд работ по формированию диаграмм направленности и получили первый патент на использование MIMO в радиосвязи. В 1993 году А. Полрадж и Т. Кайлат предложили концепцию пространственного мультиплексирования с использованием MIMO. А в 1994 году им был выдан патент № 5345599, который описывает использование пространственного мультиплексирования в беспроводной передаче данных.

В 1996 году Грег Лоури и Джерард Дж. Фошини предложили новый подход к этой технологии, когда несколько передающих антенн размещены вместе в одном передатчике, для улучшения пропускной способности системы. В BellLabs в 1998 году был представлен лабораторный макет, что является основной целью технологии для повышения производительности и повышения мощности системы связи. В 2001 году компания IospanWirelessInc. разработала первую коммерческую систему, использующую технологию MIMO-OFDMA. Технология компании Iospan сочетает в себе как кодирование, так и пространственное мультиплексирование. В 2003 году компанией Airgo начались первые в мире поставки микросхем MIMO-OFDM. В 2005 году компания Airgonetwork продемонстрировать первую версию стандарта 802.11n. Затем, в 2006 году, несколько компаний (Broadcom, Intel) вывели на рынок оборудование MIMO-OFDM для работы в предварительном стандарте WiFi IEEE802.11nWiFi. Также в 2006 году несколько компаний (BeceemCommunications, Samsung, RuncomTechnologies и т.д.) разработали различные решения MIMO-OFDMA для

широкополосного мобильного стандарта IEEE 802.16e WiMAX. Технология MIMO используется для всех 4G-систем. Широкое распространение получил стандарт WiFi 802.11n, который использует технологию MIMO. Этот стандарт позволяет достичь скорости передачи данных до 300 Мбит/с. Предыдущий стандарт 802.11g обеспечивал передачу данных со скоростью до 30 Мбит/с. Наиболее распространенным использованием 802.11n было point/multipoint system Wi-Fi при создании локальных сети (LAN). Однако аналогичное решение может быть использовано и для организации высокоскоростных магистральных каналов связи, где скорость достигает несколько сотен Мбит/с.

Так же, технология MIMO применяется в стандартах WiMAX. Один из них это 802.16e. Он позволяет передавать данные со скоростью до 40 Мбит/с в направлении от базовой станции к абоненту. Однозначно, в 802.16e технология многоканального доступа не принципиальна, а лишь является расширением конфигурации 2x2. Технология неотъемлемая часть следующей версии стандарта 802.16m, в которой конфигурация может быть и 4x4. В то же время WiMAX служит своеобразной сотовой системой связи четвертого поколения, так как имеет целый перечень характеристик, таких как эстафетная передача, роуминг и голосовая связь. Если применять WiMAX устройства, как мобильные, то скорость передачи данных будет составлять до 100 Мбит/с, а поскольку оно стационарное, скорость составит около 1 Гбит/с.

Но самое интересное применение технологии нашлось в системах сотовой связи третьего поколения. Например, в стандарте UMTS, используется в сочетании с технологией беспроводной широкополосной радиосвязи, использующей пакетную передачу данных и являющаяся надстройкой к мобильным сетям WCDMA/UMTS, где скорость передачи данных достигает 40 Мбит/с. В то же время, технологии MIMO так и не был широко использован в системе 3G. Стоит отметить, что стандарт высокоскоростной беспроводной передачи данных четвертого поколения 4G LTE, в свою очередь, повышают

стабильность соединения, независимо от местоположения абонента в ячейке системы ММО, до тех пор, пока теоретически не появится возможность передавать данные с базовой станции абоненту на более высоких скоростях. Снижение скорости передачи информации возможно только в экстремальных ситуациях, например, на значительном расстоянии от базовой станции абонента или если он находится в экранируемом помещении.

Можно увидеть, что ММО технология была широко применена практически ко всем типам беспроводных систем передачи данных. Однако возможность использования технологии в полной мере до конца не изучено. В настоящее время разрабатываются новые конфигурации систем вплоть до ММО 64x64. Все это позволит увеличить скорость передачи данных, емкость сети и спектральную эффективность.

2 Имитационное моделирование технологии ММО

2.1 Среда моделирования MATLAB

MATLAB - высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, произведения вычислений и отображения результатов. MATLAB используют для анализа данных, разработки алгоритмов и создания моделей и приложений. MATLAB активно применяется в следующих направлениях:

- обработка сигналов и связь,
- обработка изображений и видео,
- система управления,
- автоматизация проведения испытаний и измерений.

Множество инженеров и ученых используют MATLAB, как систему вычислений. MATLAB в сравнении с популярными языками программирования (C / C++, Java, Pascal, FORTRAN) дает возможность значительно упрощает разработку новых алгоритмов путем уменьшения времени решения типовых. MATLAB позволяет работать с матрицами реального, сложного и аналитического типов данных, а также со структурами данных и таблицами поиска. MATLAB имеет встроенные функции для линейной алгебры, быстрого преобразования Фурье, функции для работы с многочленами, функции для базовой статистики и численного решения дифференциальных уравнений. Встроенные математические функции используют оптимизированные процессором библиотеки, используемые для ускорения векторных и матричных вычислений. Существуют такие функции, как:

- интерполирование и регрессия;
- дифференцирование и интегрирование;
- системы линейных уравнений;
- анализ Фурье;
- матричные способы решения.

MATLAB предлагает средства получения, анализа и визуализации показателей, что позволяет исследовать проблему быстрее, чем с помощью электронных таблиц или привычных языков программирования. Результаты также можно представить в виде графиков, отчетов или листинга программного кода MATLAB. Он допускает возможность доступа к сведениям из файлов, иных программ, хранилищ данных и других внешних устройств. Пользуясь расширениями MATLAB, возможно получение материалов с всевозможных приборов, например с последовательного порта компьютера или карты, а также потоковой передачи данных с измерительной аппаратуры напрямую в MATLAB с целью их анализа и отображения. MATLAB позволяет выбирать, фильтровать и осуществлять предварительную обработку сведений. Можно исследовать показатели, анализировать гипотезы и формировать наглядные модели. MATLAB охватывает функции фильтрации, сглаживания, свертки и быстрого преобразования Фурье. Расширение содержит согласование кривых и поверхностей, многофакторную статистику, спектральный анализ, анализ изображений, системную идентификацию и другие инструменты анализа. MATLAB имеет функции для построения 2D и 3D графиков, а также функций пространственной визуализации. Графики можно строить как в виртуальном, так и в программном режиме. Наглядные примеры графического представления материалов представлены в галерее MATLAB. Для каждого примера можно ознакомиться с исходным кодом и загрузить его для пользования в прикладных программах MATLAB. Система использует векторно-матричные операции, требующиеся для решения технических задач, что позволяет быстро разрабатывать и внедрять их в производство. Используя MATLAB, программы и алгоритмы можно писать быстрее, чем на традиционных языках программирования, потому что нет нужды в таких действиях, как объявление переменных, описание типов и отведение памяти. Данный метод предоставляет шанс оперативно прорабатывать различные варианты, для того чтобы получить

приемлемое решение. Комбинируя данные интерактивные команды в сценарии или функции, можно упростить их выполнение.

MATLAB обладает встроенными алгоритмами обработки сигналов и коммуникаций, обработкой изображений и видеоданных, системами контроля и многими прочими функциями. Сочетание этих алгоритмов дает возможность внедрять в сложные программы и приложения. Simulink - среда изменяющегося межотраслевого имитирования комплексных технических средств и базовый орган имитационно-ориентированного конструирования. Основной интерфейс представляет собой инструмент составления графиков и конфигурируемый пакет блочных библиотек. Он обеспечивает непосредственную интеграцию со всей средой MATLAB и позволяет, как применять MATLAB, так и разрабатывать на его базе модели. Среда Simulink предоставляет способ использования готовых блочных библиотек для имитирования электроэнергетических, механических и гидравлических систем, а также использования различных методов при проектировании систем контроля, цифровых средств коммуникации и приборов измерений. Вспомогательные пакеты Simulink дают возможность решать весь спектр задач, включая разработку концепции модели, тестирование, верификацию, генерацию кода и аппаратную реализацию. Simulink имеет библиотеку блоков, в ней хранятся модели, которые используются при моделировании систем. Эта библиотека включает в себя:

- блоки приведения алгоритмов, к примеру, блок Сумматор (Sum), Произведения (Product) и так далее;
- структурированные блоки, такие как Мультиплексор (Mux), Селектор Шины (SelectorBus);
- дискретные и непрерывные блоки динамики.

Так же, Simulink обладает некоторыми определяющими характеристиками:

- огромный выбор готовых структурных и функциональных схем;

- простые инструменты для создания иерархических многоуровневых многокомпонентных моделей
- интерактивно-графическая среда формирования блок-схем;
- актуальные методы решения различных уравнений для непрерывного, дискретного, линейного и нелинейного представления объектов;
- практичная диалоговая визуализация выходных сигналов, инструменты для и подстройки входных воздействий;
- инструменты для отладки и аналитики моделей;
- полноценное слияние с MATLAB, охватывающее численные методы, визуализацию, анализ данных и графические интерфейсы.

Так же, в MATLAB существует набор функций SystemToolbox, который предлагает средства для конструирования, имитаций и подтверждения пригодности общепринятых средств коммуникации. Данный комплекс средств позволяет ускорить создание алгоритмов и элементов физического уровня, обеспечивает стандартную среду для подтверждений проектов и их пригодности, а также возможности для формирования тестовых сигналов. Он дает возможность конфигурировать, моделировать, измерять и анализировать комплексные коммуникационные линии. Помимо этого, возможно использовать эти средства для формирования и повторного использования тестовой среды проектов, прототипов и реализаций на соответствие стандарту. В состав компонентов входят:

- кодирование каналов с согласованием скорости, скремблированием и модуляцией;
- операции MIMO, включая компоновку потоков и предварительное кодирование;
- конфигурирование ресурсных элементов и получение сигналов для OFDM и SC-FDMA;
- канальная синхронизация, сдвиг и восстановление частоты;

- оценка идеального канала, а также нисходящего и восходящего каналов связи;
- демодуляция и декодирование каналов.

SystemToolbox предлагает широкую классификацию частотно-временной матрицы источников. Данная матрица описывает конфигурацию, используемую для систематизации данных и мультиплексирования разнообразных каналов и сигналов прежде, чем передавать символы OFDM по каждой антенне. Работая с функциями генерации и заполнения различного рода матричных элементов, можно проконтролировать корректность проекта, найти и отобразить ошибки в его реализации. SystemToolbox предоставляет возможность имитировать и моделировать элементы устройств на физическом уровне. Моделирование на уровне каналов позволяет получить предполагаемые результаты эффективности, учитывающие пропускную способность и частоту ошибок блоков, а также провести оценку реальных моделей на основе результатов симуляции. Набор инструментов системы предоставляет возможность качественно спроектировать систему, например, посредством моделирования на канальном уровне, что предусматривает ряд параметров, необходимых для проектирования систем связи с определенным типом конфигурации и способом получения радиосигнала.

Основные характеристики SystemToolbox:

- имеет библиотеку моделей, соответствующих стандартам LTE и LTEAdvanced;
- есть возможность формирования диаграмм направленности и передачи сигналов многоантенными системами с использованием технологии MIMO;
- возможна реализация приемопередатчика на физическом уровне, включая нисходящий канал и восходящий канал;
- интерактивные средства для верификации соблюдения стандарта и определения количества битовых ошибок;

- Прилагаются модели для тестирования и источники сигналов для эталонного определения параметров канала;
- возможность производить оценку качества канала связи и функции приёма по технологии MIMO.

2.2 Иммитационная модель

Целью работы является исследование помехоустойчивости в канале приема технологии MIMO при различных способах модуляций в среде MATLAB. В работе исследуется помехоустойчивость канала связи с использованием SISO- и MIMO-систем. Моделирование алгоритмов проводилось для системы MIMO с двумя передающими и приемными антеннами с релейскими замираниями. При этом сигнал модулировался такими способами, как:

- BPSK–Binary Phase Shift Keying;
- QPSK–Quadrature Phase Shift Keying;
- 16, 32, 64-QAM - Quadrature Amplitude Modulation

Реализация модели осуществлена в среде Simulink на основе пакета прикладных программ MATLAB. Модели SISO- и MIMO-систем представлены на рисунках 2.1 и 2.2 соответственно.

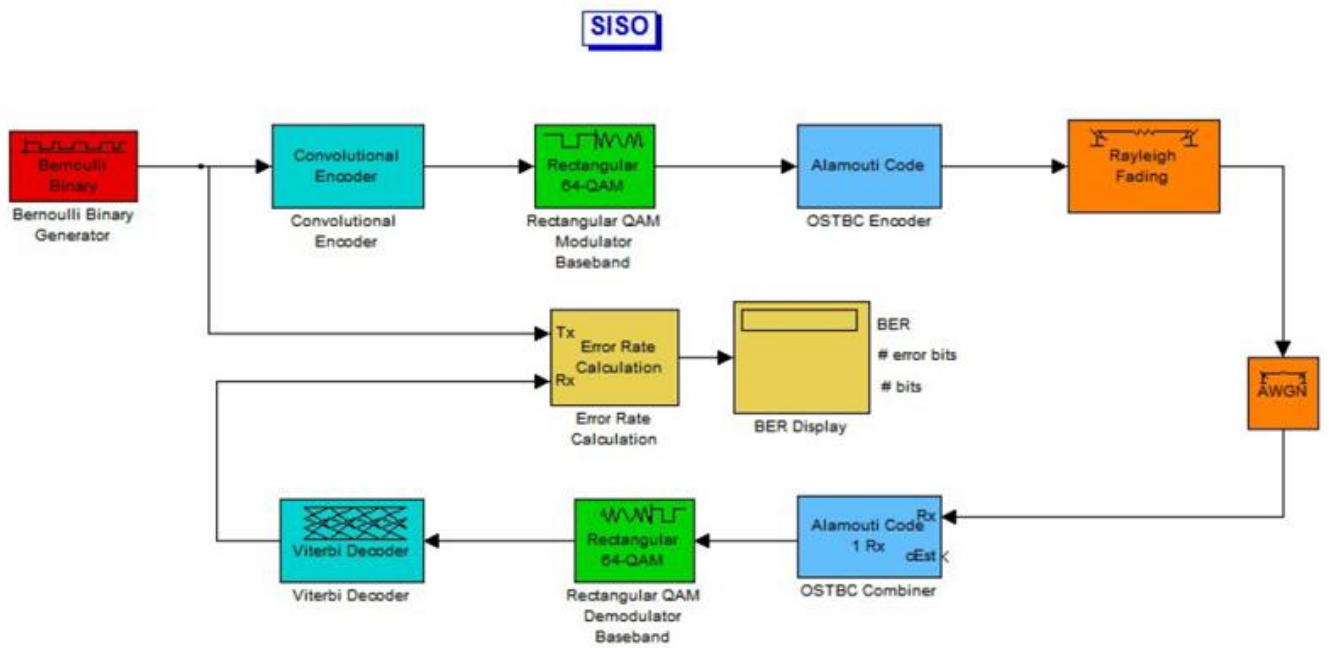


Рисунок 2.1 – Имитационная модель SISO-системы

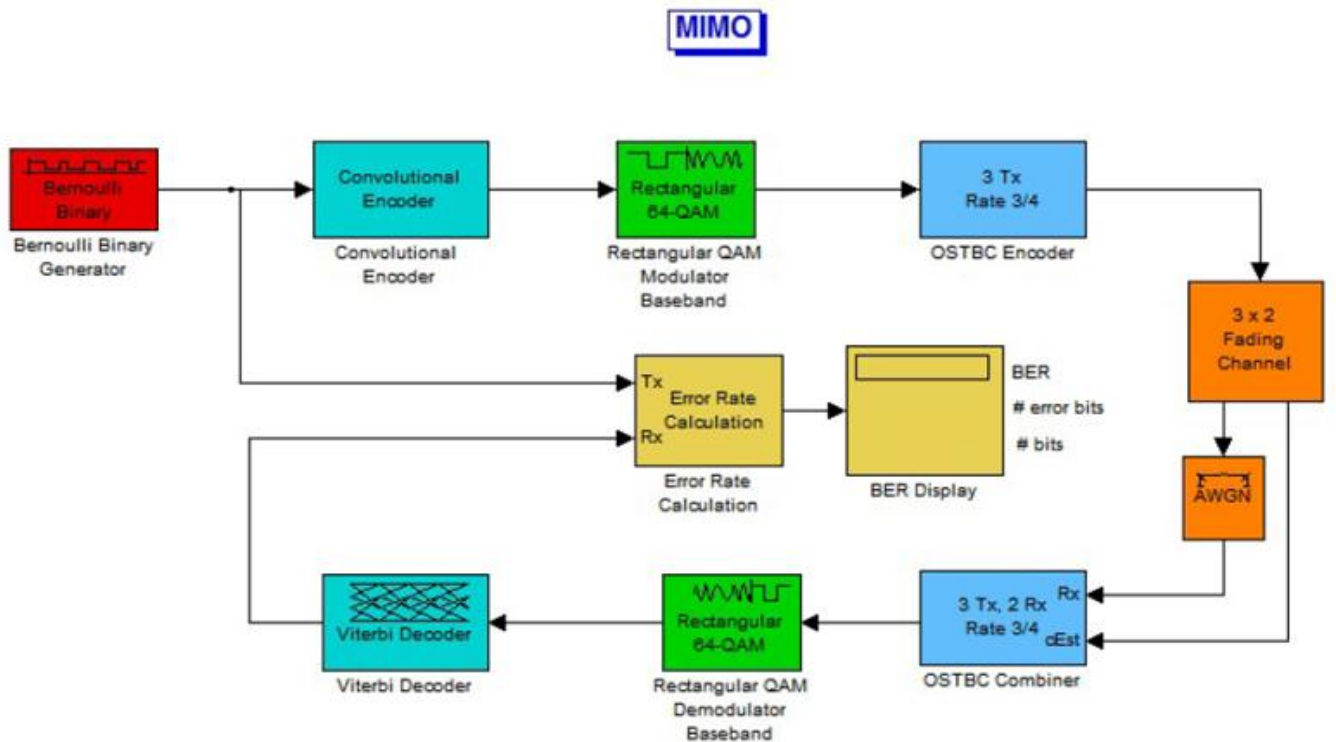


Рисунок 2.2 – Имитационная модель MIMO-системы

Алгоритм работы рассматриваемых систем происходит следующим образом:

- источником сигнала (BernoulliBinaryGenerator) создается случайная двоичная последовательность, поступает на свёрточный кодер, где кодируется вся передаваемая последовательность;
- сигнал поступает на модулятор, где задаются данные об изменении фазы;
- модулированный сигнал по два символа поступает на вход пространственно-временного блочного кодера Аламоути, сигнал перемножается, и отдельно передается на каждую передающую антенну;
- приемные антенны принимают разнесенный сигнал по релейскому каналу, а затем происходит процесс демодуляции;
- происходит подсчет битовых ошибок (BER), а затем результат выводится на дисплей.

Для оценки алгоритмов обработки принятого сигнала использовался коэффициент битовых ошибок (BER), величина, которого определяет помехоустойчивость в канале связи. BER равен отношению ошибочно принятых бит к общему числу бит, то есть:

$$BER = \frac{\sum_{i=1}^k (a_i - \hat{a}_i)}{K},$$

где a_i – передаваемый бит, а \hat{a}_i – оценка передаваемого бита в приемнике. K – это длина всей последовательности бит в приемнике.

Качество сигнала оценивается безразмерной стандартной величиной производительности систем связи, а именно отношением сигнал/шум (E_b/N_0).

С увеличением требуемого значения ОСШ, улучшаются характерные показатели процесса детектирования при заданном значении BER. По итогам моделирования получаются графики зависимости значения BER от отношения сигнал/шум E_b/N_0 .

Для построения схемы канала связи были задействованы следующие элементы среды программного обеспечения Simulink:

BernoulliBinaryGenerator – генератор случайных двоичных последовательностей, этот блок генерирует случайные двоичные числа, используя двоичное распределение Бернулли. Сигнал данных генерирует поток информационных битов, передаваемых передатчиком, в частности, в качестве генератора сигналов данных используется двоичный генератор Бернулли. На рисунке 2.3 представлено окно параметров блока.

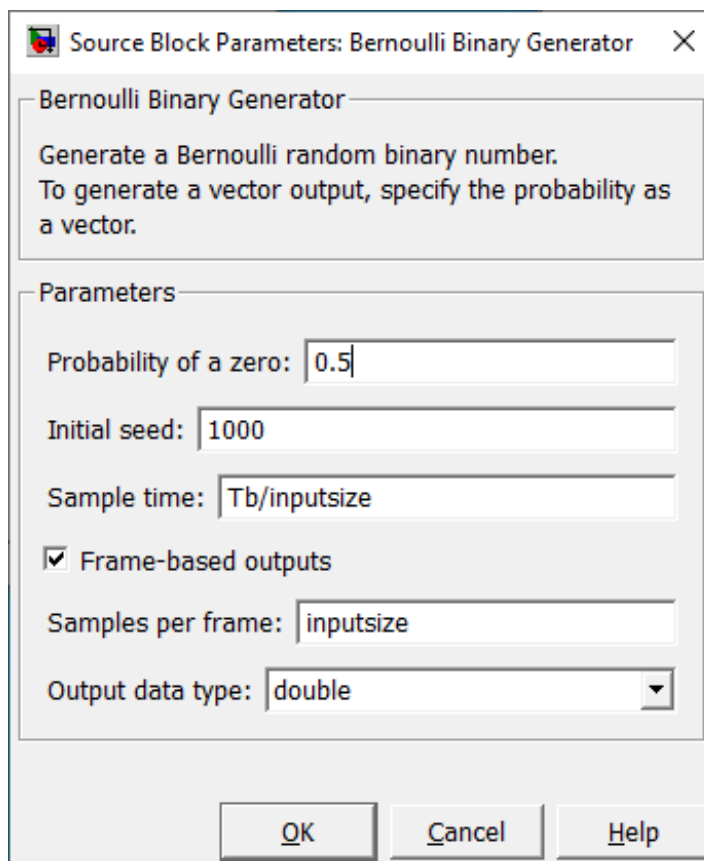


Рисунок 2.3 – Окно параметров Bernoulli Binary Generator

RectangularQAMmodulatorbaseband – широкополосный прямоугольный модулятор, предназначенный для модуляции сигналов, который состоит из блока параметров M-arynumber.

На рисунке 2.4 представлено окно параметров блока. При установлении Integer в параметрах Inputtype, блок принимает целые значения на интервале от 0 до M-1. При установлении Bit в параметрах Inputtype, блок принимает значения с бинарным знаком, которые так же являются целыми числами. В параметрах значение Constellationordering представляет, каким образом блок присваивает

двоичные числа синфазным и квадратурным компонентам сигнального созвездия. Возможно Binary - естественное кодирование, а так же GrayK - означает, что будет использовано серо-закодированное созвездие, либо же блочные коды с отличием по одному-двум битам. В параметрах значение Minimumdistance указывается минимальное расстояние между точками созвездия. Параметр Peakpower - является пиковой мощностью символа в созвездии.

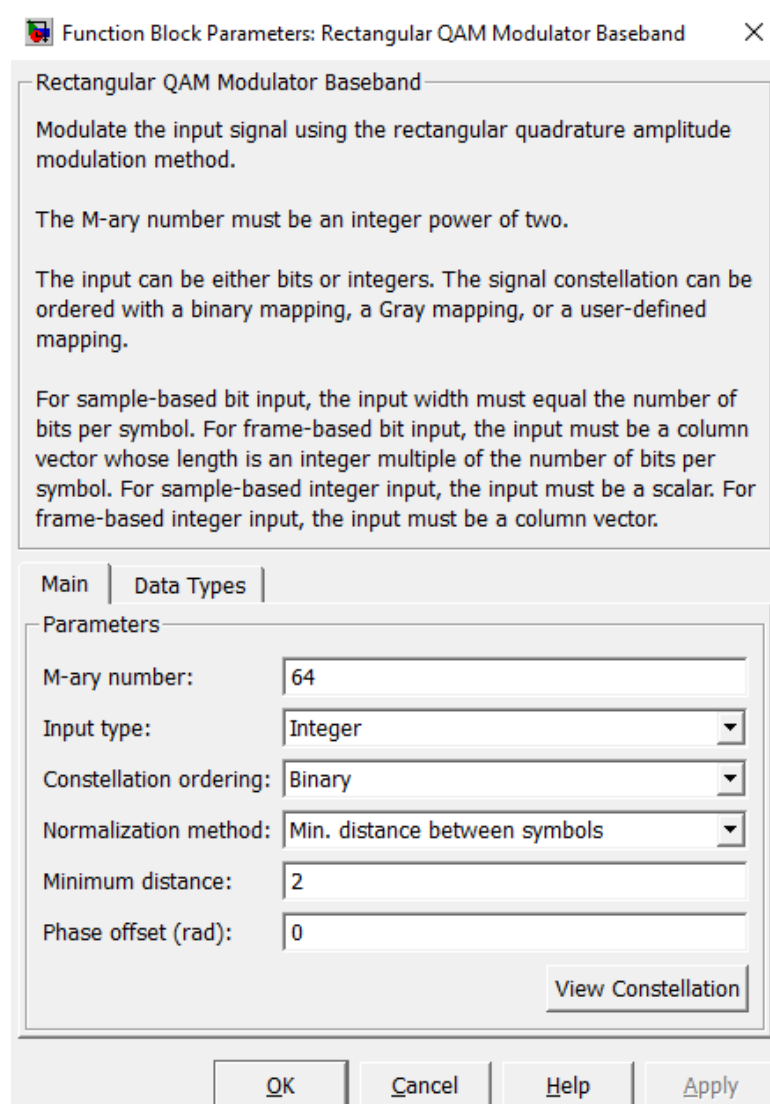


Рисунок 2.4 – Окно параметров Rectangular QAM modulator baseband

Rectangular demodulator QAM baseband – широкополосный прямоугольный модулятор. Используется для демодуляции квадратурной амплитудно-модулированных сигналов.

Окно параметров блока представлено на рисунке 2.5. Сигнальное созвездие имеет точки M , где M является параметром M-ary number. Блок масштабирует сигнальное созвездие на основе установленного значения параметра Normalization method.

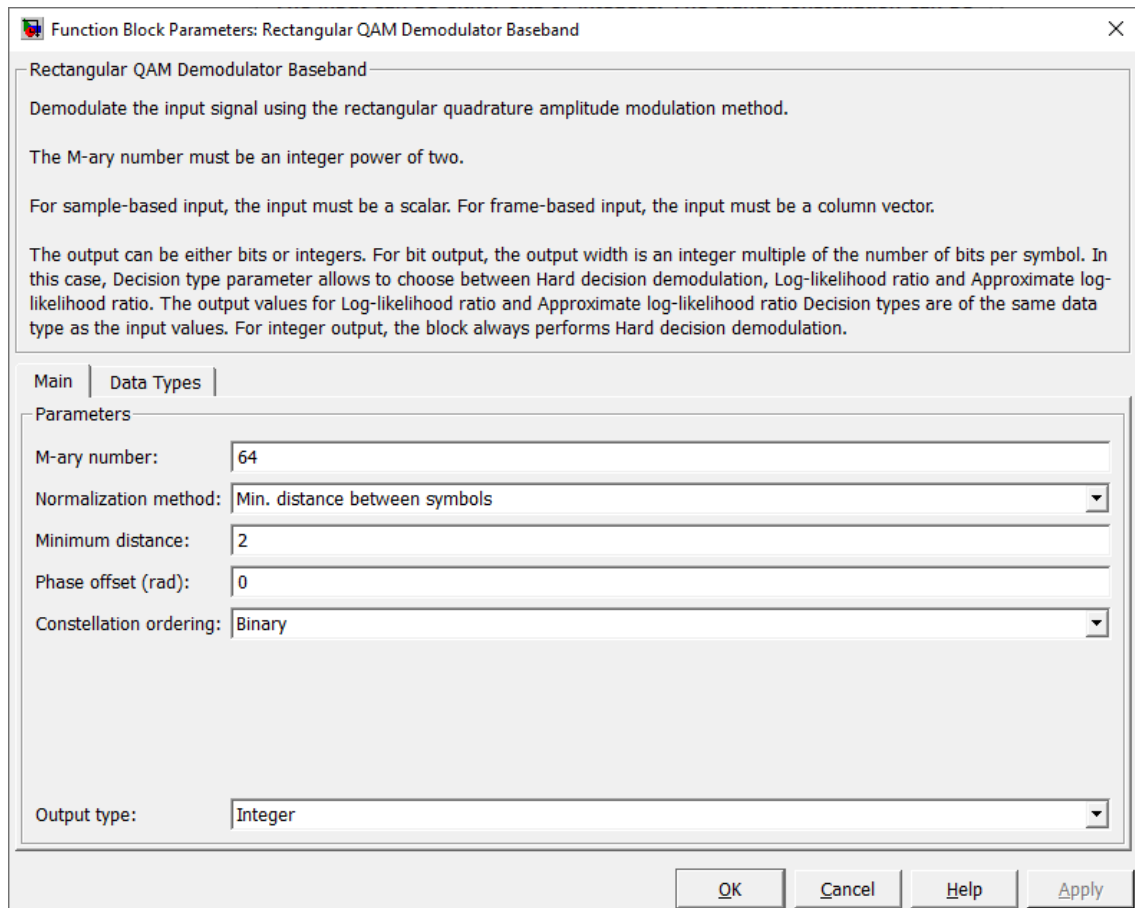


Рисунок 2.5 – Окно параметров Rectangular demodulator QAM baseband

AWGN Channel – канал АБГШ, предназначен для получения реально выходного сигнала, путем добавление гауссовского шума. Окно параметров представлено на рисунке 2.6. Длина исходных данных соответствует количеству каналов входного сигнала и может быть, как скалярной, так и векторной. Имитационный блок при каждом запуске выводит один и тот же сигнал. Входной сигнал блока может быть векторным, скалярным или матричным, а так же с одним или двоичным типами данных. В данном блоке можно выбрать режим, в котором задается значение шума (E_b/N_0 , E_s/N_0 , SNR) - отклонение маски или отклонение порта. Все перечисленные параметры характеризуют значение отношения сигнал/шум, но

они различаются между собой. E_b/N_0 (dB) – показывает отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума, в децибелах; E_S/N_0 (dB) – отношение энергии символа к спектральной плотности мощности шума, в децибелах; SNR (dB) – отношение мощности сигнала к мощности шума в децибелах.

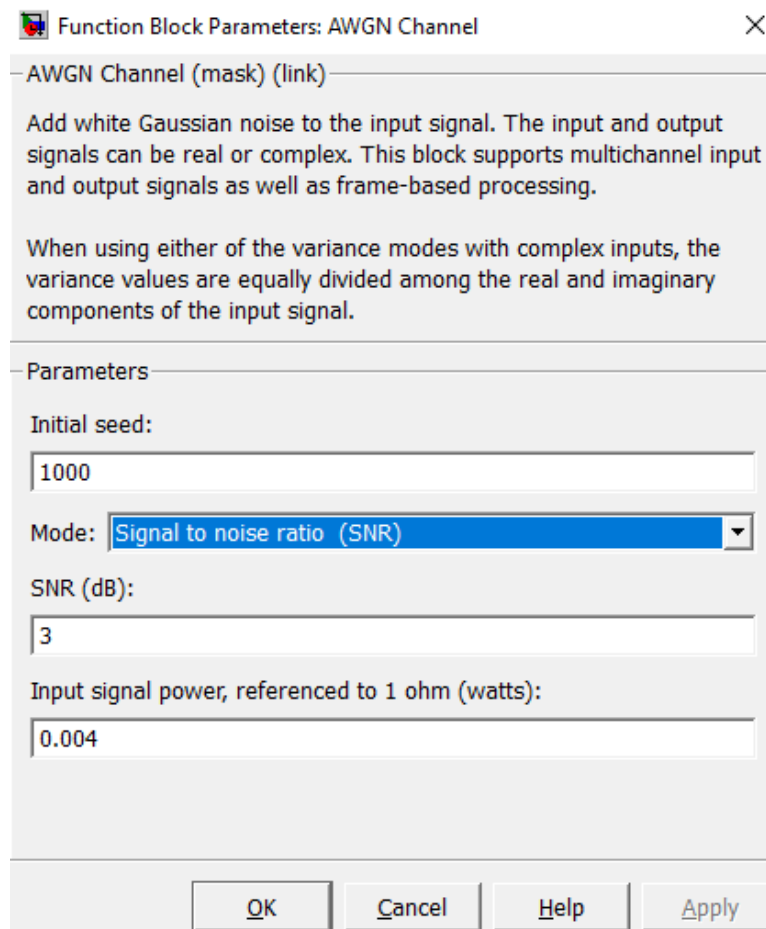


Рисунок 2.6 – Окно параметров AWGN Channel

TheMultipathRayleighFadingChannel – блок максимального доплеровского сдвига. Он предназначен для имитации многолучевого канала распространения сигнала. Чаще всего этот блок используют для имитации мобильных сетей связи. Данный блок получает входные данные векторного столбца или скалярное значение. На рисунке 2.7 представлено окно параметров. Параметр MaximumDopplershift (Hz) указывает на значение скалярной величины с максимальным эффектом Доплера. Dopplerspectrumtype – доплеровский спектр, можно указать такие типы значений, как плоский, Гауссовский, округленный,

ограниченный `Jakes.Discretepathdelayvector` (s) и `Averagepathgainvector` (dB) – вектора, которые задают задержку и усиление соответственно.

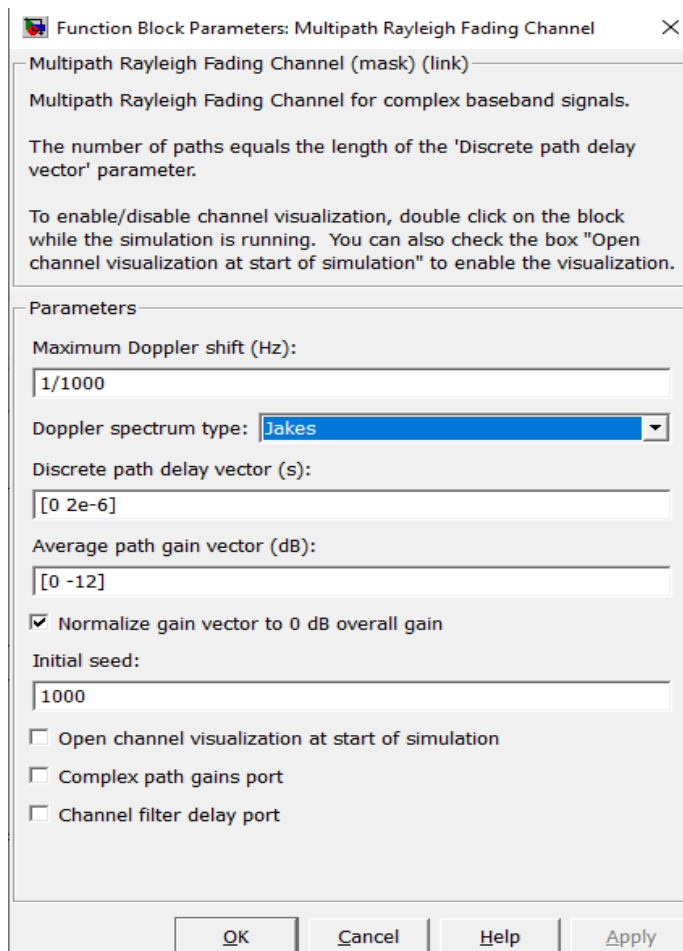


Рисунок 2.7 – Окно параметров Multipath Rayleigh Fading Channel

OSTBC Encoder – пространственно-временной блочный кодер, предназначенный для кодирования символов с помощью ортогонального блочного кодирования Аламоути. Блок отображает входные символы друг за другом и объединяет выходные матричные кодовые слова по времени. На рисунке 2.8 представлено окно параметров блока. Здесь можно установить скорость передачи кода, а так же выбрать количество антенн на передающей стороне. Устройство поддерживает конфигурацию двух, трех или четырех передающих антенн. По умолчанию стоит две передающие антенны.

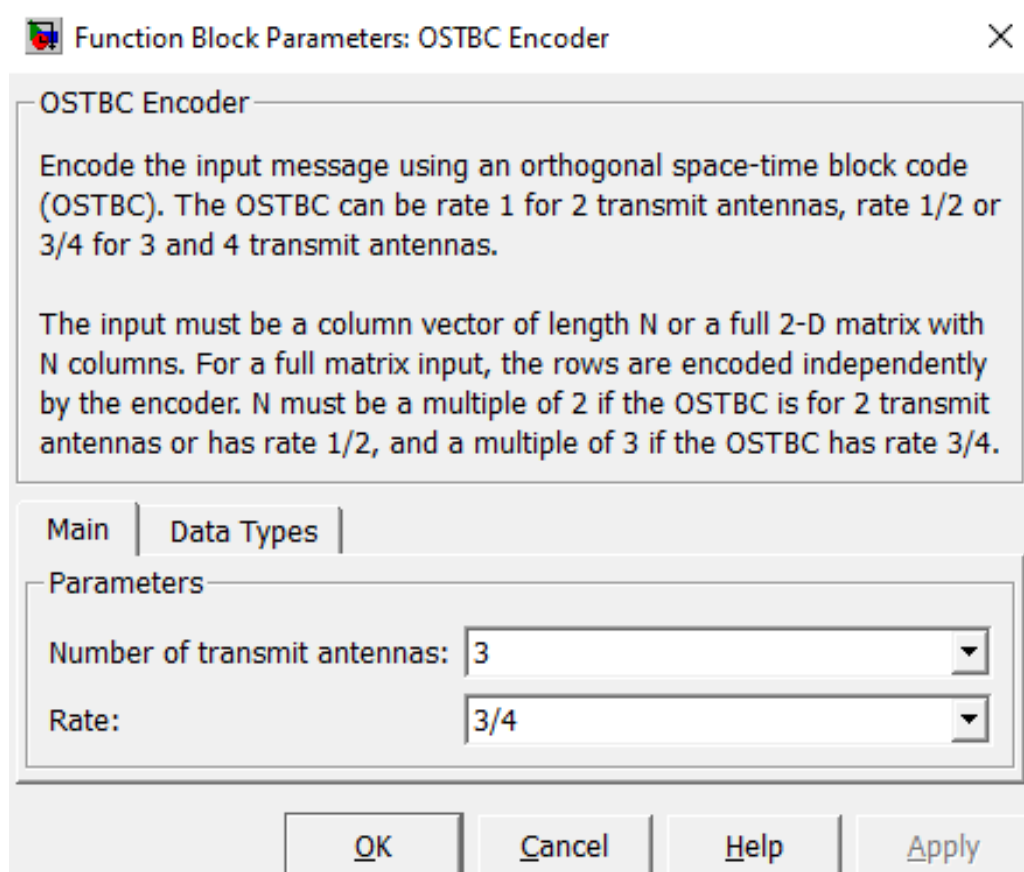


Рисунок 2.8 – Окно параметров OSTBC Encoder

OSTBC Combiner - пространственно-временной блочный сумматор. С использованием ортогонального пространственно-временного кода суммирует значения принятых символов и производит оценку их для извлечения полезной информации, которая была закодирована. Оценка входного сигнала не может быть постоянной во времени, поэтому этот блок использует алгоритм для оценки только первого периода символа. Операция кодирования для каждого символа происходит самостоятельно. В параметре `Numberoftransmitantennas` можно указать номер передающей антенны. Параметр `Rate` указывает на символ кода и его уровень, по умолчанию значение уровня стоит единица. Параметр `Numberofreceiueantennas` задает число задействованных антенн, для получения потоков сигнала, по умолчанию это значение стоит единица. На рисунке 2.9 показано окно параметров блока.

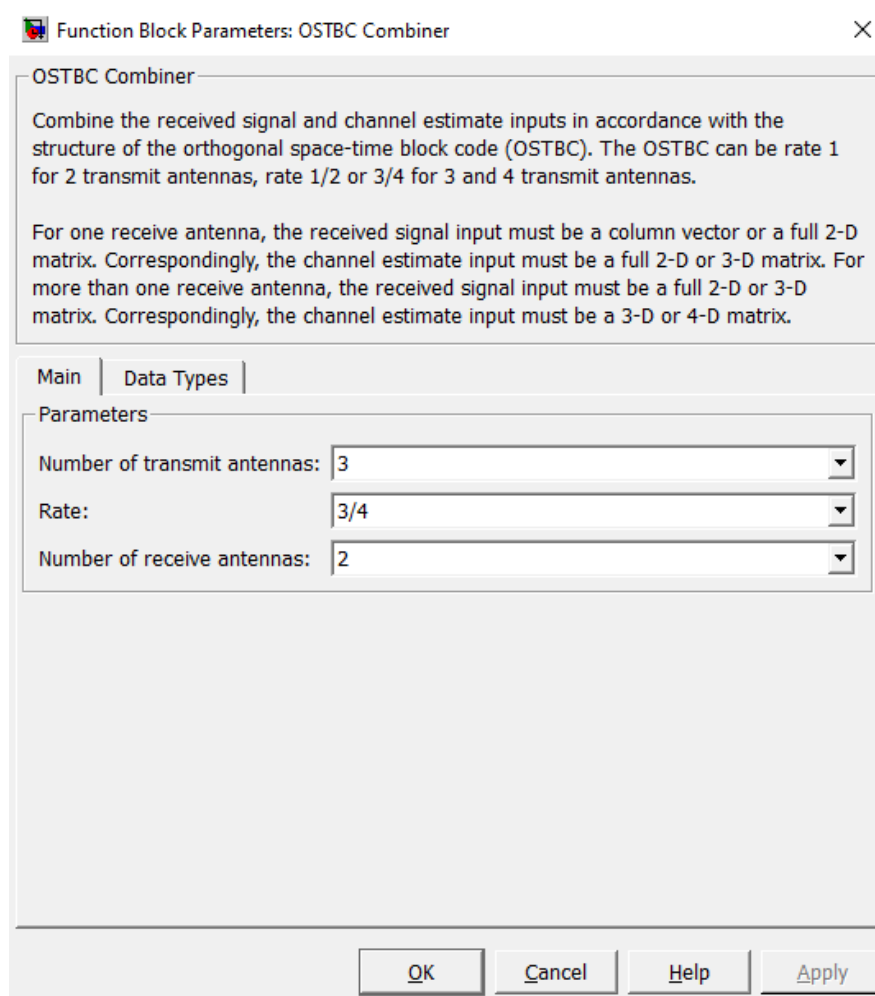


Рисунок 2.9 – Окно параметров OSTBC Combiner

Проведено сравнение SISO и MIMO систем связи с общими релейскими замираниями. Из результатов видно, что наилучшими свойствами помехоустойчивости обладает канал с MIMO, так как возможность "корректного" воссоздания передаваемого сигнала увеличивается, поскольку идентичные данные передаются одновременно всеми антенными массивами, использующими как временное, так и пространственное кодирование. Также, для менее помехозащищённого типа модуляции 64-QAM, допустимым уровнем ошибочно принятых бит при ОСШ равным 20 дБ является $BER = 10^{-6}$, а для более низких типов модуляции значение ОСШ является ниже. Результаты моделирования представлены на рисунках 2.10 и 2.11.

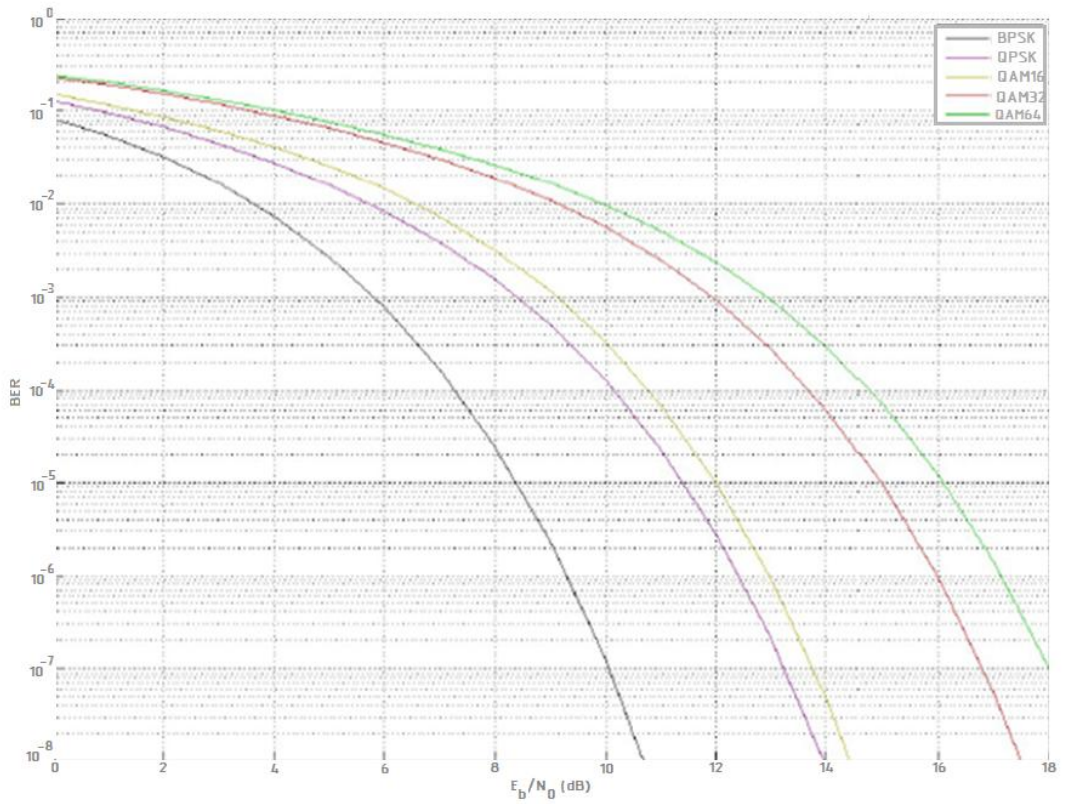


Рисунок 2.10 – Кривые зависимости BER от E_b/N_0 для системы SIMO

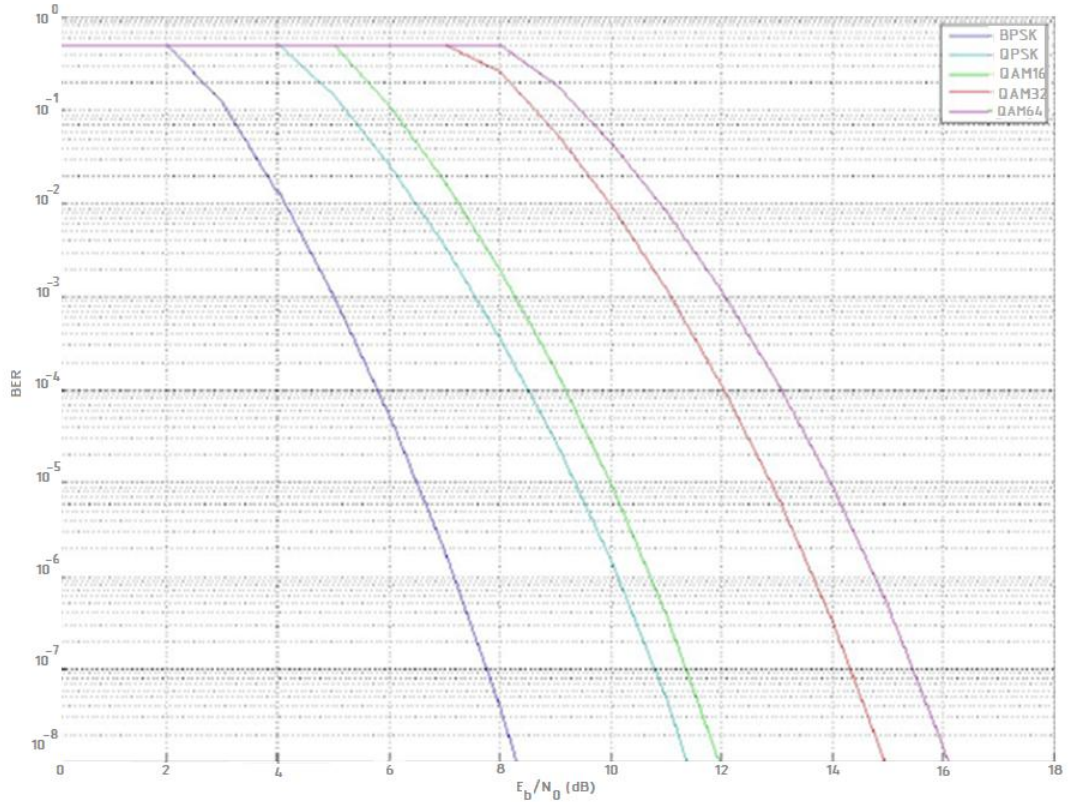


Рисунок 2.11 – Кривые зависимости BER от E_b/N_0 для системы MIMO

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, системы ММО значительно повышают пропускную способность сети за счёт пространственного разделения каналов. С увеличением количества передающих и принимающих антенн полоса пропускания системы ММО увеличивается почти пропорционально росту количества антенн, увеличение каналов связи можно использовать для того чтобы создать множество параллельных связей для передачи, и таким образом улучшить надежность системы.

В Выпускной квалификационной работе было проведено исследование технологии ММО, а так же была разработана модель премо-передающего устройства телекоммуникационных систем с SISO- и ММО-каналом. На основе разработанных моделей были получены кривые зависимости BER от E_b/N_0 для систем SISO и ММО. Проведено сравнение SISO и ММО систем связи с общими релеевскими замираниями. Результаты показали, что наилучшими свойствами помехоустойчивости обладает канал с ММО, так как возможность "корректного" воссоздания передаваемого сигнала увеличивается, поскольку идентичные данные передаются одновременно всеми антенными массивами, использующими как временное, так и пространственное кодирование. Также, для менее помехозащищённого типа модуляции 64-QAM, допустимым уровнем ошибочно принятых бит при ОСШ равным 20 дБ является $BER = 10^{-6}$, а для более низких типов модуляции значение ОСШ является хуже.

Так же можно увидеть, что ММО технология была широко применена практически ко всем типам беспроводных систем передачи данных. Однако возможность использования технологии в полной мере до конца не изучено. На сегодняшний день популярна система разнесенной передачей с конфигурацией 64x64. Все это позволит увеличить скорость передачи данных, емкость сети, повысить помехоустойчивость, а так же спектральную эффективность систем телекоммуникационных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слюсар В.И. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов.ж. Электроника: наука, технология, бизнес, №8, 2006.
2. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. - Москва: Изд-во «Горячая линия - Телеком», 2014. - 244 с.
3. Сперанский В.С., Евдокимов И.Л. Основные характеристики беспроводных систем связи ММО. ж.Электросвязь, №3, 2008. - С. 122-125.
4. EzioBiglieri, RobertCalderbank, AnthonyConstantinides, AndreaGoldsmith, ArogyaswamiPaulraj, N. VincentPoor.ММОwirelesscommunications. - Cambridge, New York, 2007 год. - 343 стр.
5. Маглицкий Б.Н. Технология LTE систем сотовой связи четвертого поколения. - Новосибирск: СибГУТИ, 2010. - 168 с.
6. Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Воробьев В.О., Гусаров А.С., Слышков А.С., Шуньков Р.В. Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMax. – СПб.: Линк, 2012. – 226 с.
7. Шувалов Р.И. Место технологии ММО в составе беспроводной сети.ж. Молодой ученый. №27, 2017.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. / Бернард Скляр пер. с англ. – М: Вильямс, 2003. – 1104с.
9. Gesbert D., Shafi M., Shiu D.-S., Smith P. J., Naguib A. «From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems» / IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2003. –С. 281–302.

