

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.

**МОДЕЛЬ КОДЕКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ,  
ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЮ MIMO**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–Д.11.03.02.2020.227.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы,  
должность  
\_\_\_\_\_ В.С. Спицын  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы,  
студент группы КЭ-411  
\_\_\_\_\_ А.А. Плешакова  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Нормоконтролер,  
\_\_\_\_\_ В.Д. Спицына  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## РЕФЕРАТ

Плешакова А.А. Модель телекоммуникационной системы, использующей технологию ММО – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН, 2020, 45 с., 17 илл., библиогр. список – 4наим.

Ключевые слова: пространственно-временные блочные коды, схема Аламоути, технология ММО

Объект исследования: технология ММО, схема Аламоути.

Цель работы: моделирование системы по заданному алгоритму.

В работе были рассмотрены методы кодирования и декодирования в телекоммуникационных системах, использующих технологию ММО. Изучен алгоритм работы схемы Аламоути и пространственно-временных блочных кодов.

Были определены параметры блоков модели, а так же проведено сравнение помехоустойчивости системы в зависимости от количества используемых антенн.

Работа была реализована с помощью программного продукта MATLABR2017a Simulink.

					ЮУрГУ-Д.11.03.02.20.227.00 ПЗ ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Плешакова А.			Модель телекоммуникационной системы, использующей технологию ММО		
Провер.		Спицын В.С.					
						3	45
Н. Контр.		Спицына В.Д.			ЮУрГУ Кафедра ИКТ		
Утверд.		ДаровскихС.Н					

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Теоретическая часть .....	7
1.1 Технология ММО .....	7
1.2 Закон шеннона и пространственное разнесение .....	14
1.3 Пространственно-временное блочное кодирование .....	18
2 Моделирование .....	24
2.1 Канал связи, использующий код АЛМОУТИ .....	24
2.2 Результаты моделирования .....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	44
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	45

## ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие характеризуется интенсивным развитием систем беспроводной связи (мобильная радиосвязь, системы беспроводного доступа к сети Интернет, компьютерные радиосети внутри зданий и др.). В каналах радиосвязи таких систем действует комплекс помех и искажений. В первую очередь необходимо учитывать влияние многолучёвости, причиной которой является наличие отражений на трассе распространения радиоволн. В диапазоне коротких волн действуют многократные отражения от неоднородностей ионосферы. В диапазонах метровых (дециметровых) волн сказываются отражения от зданий, неровностей рельефа (при организации связи на открытой местности), отражения от стен и конструкций (при связи внутри зданий). Сильные замирания сигнала в канале затрудняют оценку переданных сообщений и приводят к искажениям передаваемой информации. На первых этапах развития радиосвязи единственным методом повышения помехоустойчивости передачи в каналах с замираниями считалось пространственное разнесение приемных антенн. Идея применения разнесения для борьбы с замираниями заключается в совместном использовании на приеме нескольких сигналов, несущих одну и ту же информацию, но пришедших различными путями. Разнесение должно выбираться таким образом, чтобы вероятность одновременных замираний всех используемых сигналов была много меньше, чем какого-либо одного из них. В теории приема сигналов в условиях замираний устоялось мнение, что радикальным методом борьбы с замираниями радиосигналов является разнесение приемных антенн и лучшим методом объединения является оптимальное «весовое» сложение по критерию максимума отношения сигнал/шум.

Исследование технологий сетей беспроводной связи является очень важной задачей. Так как использование высококачественной и высокоскоростной связи в современных условиях является необходимым.

Проблемы планирования беспроводных сетей возникли еще с начала подготовки к их массовому развертыванию. Трудности заключаются в расчете теоретического покрытия территории, а также прогнозирования степени загрузки сети и распределения частот и учет особенностей антенного оборудования. Поэтому очень часто созданные сети работают не оптимально и значения фактических измерений качества значительно отличаются от теоретически рассчитанных.

Для решения проблемы планирования новых и оптимизации существующих сетей внедряются с каждым новым поколением все больше и больше новых технологий. Эти технологии позволяют проводить реализацию для использования пятого и предыдущих поколений мобильных сетей. Одна из этих технологий - MIMO.

Преимуществами использования такой технологии есть огромные возможности, которые она предлагает. Технология позволяет существенно улучшить пропускную способность сигнала, не расширяя при этом полосу. Использование этой технологии позволяет раздавать сразу несколько потоков информации всего по 1 каналу с последующим прохождением их через 2 или более антенн до того, как попадут в независимые приемные устройства для трансляции радиоволн. Также более, чем в 2 раза, увеличивается скорость трансляции и качество передаваемого сигнала, а также скорость передачи данных становится лучше, ибо технология изначально кодирует данные, а потом их восстанавливает на приемной стороне. Все это дает возможность говорить о том, что применение указанной технологии является весьма перспективным. То есть решается и проблема модификации уже существующих сетей, и возможность удовлетворения потребностей потенциальных пользователей сетью новых стандартов.

Целью работы является определение и исследование основных возможностей технологии MIMO и создание модели кодека системы, использующей данную технологию.

## 1 Теоретическая часть

Для решения поставленных задач и успешной работы модели необходимо изучить аспекты теории, касающиеся используемой технологии. В данной главе рассмотрены принципы технологии MIMO, алгоритмы кодирования.

### 1.1 Технология MIMO

Радиосистемы, использующие технологию MIMO (multipleinput, multipleoutput), становятся всё более распространёнными за последние несколько десятилетий, причём заметными примерами являются сети Wi-Fi и сотовые сети 3G/4G, LTE и MassiveMIMO, которые составляют значительную часть современной коммуникационной инфраструктуры. В последнее время MIMO находит своё применение в быстроразвивающихся областях, таких как профессиональное телевидение, правоохранительные органы и государственные секторы, благодаря новым поколениям небольших и более эффективных радиотехнических решений и конструкций антенн, поддерживающих технологию MIMO. С учётом требований к пропускной способности, предъявляемых к современным видео-, аудио- и информационным системам, MIMO часто является идеальным решением для связи, особенно в городских условиях, где чёткая линия участка труднее достижима, а так же обилие радиочастотных и микроволновых систем, которые могут создавать проблемы с помехами.

В настоящее время используется множество типов систем MIMO, причём различные производители радиотехники предлагают свои собственные версии технологии с уникальными характеристиками и преимуществами. Новое поколение небольших, высокопроизводительных радиостанций позволяет использовать преимущества технологии как в небольших компаниях, так и в крупных организациях. Возможности mesh-сетей применительно к многим

радиосистемам обеспечивают динамическое развертывание и быстрое реагирование на изменение ситуации без перебоев в работе сети.

Система, использующая технологию ММО, это форма разнесения антенн, которая использует несколько антенных устройств для улучшения качества сигнала. Данные разделяются на несколько потоков и рекомбинируются на приёмной стороне с таким же количеством антенн. Приёмник сконструирован таким образом, что учитывает небольшую разницу во времени между приёмами каждого сигнала, любых дополнительных шумов, помех и даже потерянных сигналов[1].

Передавая одни и те же данные по нескольким потокам, системы с ММО вводят избыточность в передачу данных, которую не могут обеспечить классические одиночные антенные системы SISO – Singleinput, Singleoutput). Это даёт многоантенным комплексам несколько преимуществ по сравнению с типичными конфигурациями SISO:

Радиоприёмники ММО могут использовать отраженные радиочастотные передачи такие как многолучевое распространение, для фактического улучшения уровня сигнала даже без чёткого соединения с линией связи, поскольку приёмные устройства, использующие эту технологию, принимают и объединяют несколько потоков одних и тех же данных, которые доставляются в нескольких разных временных интервалах. Это особенно полезно в условиях города, где ухудшение сигнала между одиночными антеннами без чёткого участка линии связи является серьёзной проблемой. Городская среда обеспечивает множество путей отражения для сигналов, которые можно принимать между приёмными и передающими радиостанциями.

Общая пропускная способность может быть улучшена, что позволит увеличить качество или количество видео и других данных, передаваемых по сети.

При использовании нескольких потоков данных, такие проблемы, как затухание, вызванное потерей или сбросом пакетов данных, могут быть уменьшены, и это приводит к улучшению качества видео или аудио.

На рисунке 1 представлена схема телекоммуникационной системы, использующей описанную выше технологию.

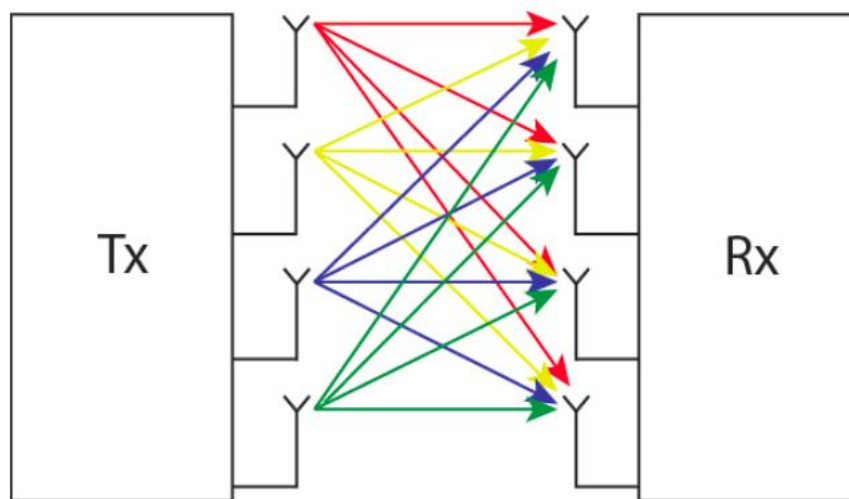


Рисунок 1 – Пример системы MIMO, использующей четыре приёмных антенны и четыре передающих

Некоторые системы MIMO имеют возможность соединяться в самоорганизующиеся сети, например, человек с портативным радио или автомобилем с бортовой системой MIMO), может подключаться и выходить из сети в любое время и автоматически пересылать данные от других пользователей узла через сеть, самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся, которая не зависит от центральной архитектуры для правильной работы.

Возможность воспользоваться преимуществами сетей открывает системы с MIMO для новых пользователей, нуждающихся в надёжном, масштабируемом сетевом покрытии. Эти системы практичны, поскольку продолжают уменьшаться в размерах. Базовые станции и сетевые ретрансляторы могут быть быстро



развёрнуты для краткосрочных событий, требующих большей зоны покрытия, без хлопот постоянной установки.

Примерами групп пользователей, которые используют преимущества систем ММО.

1) Оперативные сотрудники, часто работающие в непредсказуемых условиях и хаотичных, изменяющихся ситуациях и не могут полагаться на сотовые сети или другую существующую фиксированную инфраструктуру, они должны быть на связи несмотря на перебои в подаче электроэнергии, перегруженные сети или стихийные бедствия.

2) Телевидение, например, спортивные трансляции и новостные передачи, где сюжет может измениться во время трансляции и места передачи, могут перемещаться без дополнительного уведомления, или съемка может включать в себя несколько областей одновременно. Устранение длинных и дорогих кабельных линий является ещё одним важным преимуществом для этого рынка.

3) Правоохранительные органы или военные структуры, которым необходимо управлять собственными отдельными сетями связи на выделенных радиоканалах, например, внутригрупповое сообщение или крупные сети как наземный транспорт.

Радиосистемы ММО используют несколько антенн для передачи и приема нескольких потоков данных одновременно. Количество необходимых антенн определяется производителем радио на основе того, что они определяют, будет работать для оптимальной передачи и приема с их конкретным оборудованием и программным обеспечением.

Типичными конфигурациями являются:

- 2x2 ММО (две передающие антенны, две приемные антенны);
- 3x3 ММО (три передающие антенны, три приемные антенны);

- 4X4 MIMO (четыре передающие антенны, четыре приемные антенны);
- 8x8 MIMO (восемь передающих антенн, восемь приемных антенн).

Чем больше антенн имеет система, тем больше одновременных потоков данных может быть передано одновременно, улучшая радиосвязь. Однако индивидуальные настройки системы, текущие физические и радиочастотные условия окружающей среды, а также достижения в области радиотехники могут влиять на то, что большее количество антенн не всегда соответствует лучшей производительности системы.

Существует множество вариантов антенн для радиостанций MIMO, в зависимости от того, как пользователь желает настроить свою радиосистему на основе уникальных потребностей своего приложения.

Антенны для использования MIMO можно разделить на следующие категории.

1. Традиционные вертикально поляризованные дипольные антенны. Это те же самые антенны, которые используются в системах SISO, с той лишь разницей, что система MIMO будет использовать две или более одинаковых антенн. На практике можно использовать практически любую всенаправленную антенну, если она соответствует требованиям к полосе частот, коэффициенту усиления, обработке мощности высокочастотных сигналов и другим параметрам для заданной системы.

2. Многоантенные изделия, содержащиеся в одном обтекателе. Эти антенны содержат два или более радиочастотных разъема, каждый из которых соединяется с другой антенной внутри обтекателя. Они часто проектируются с наклонной левой и наклонной правой поляризацией, причем каждый элемент смещен на 90 градусов (ортогонально) от другого, обеспечивая дополнительное разнесение поляризации антенны для занятых радиочастотных сред без увеличения сложности установки системы для конечного пользователя.

Как и в случае систем SISO, системы MIMO могут использовать всенаправленные антенны или направленные панели и секторные антенны для различных сценариев связи и потребностей в покрытии.

Радиосистемы MIMO могут использовать преимущества нескольких типов схем поляризации антенн для улучшения разнесения, что является одним из ключевых способов обеспечения надежной связи между системами MIMO даже в сложных условиях, которые могут оказаться трудными для одиночных антенных радиосистем.

Все антенны имеют определенное направление поляризации, которое определяется их конструкцией и представляет собой направление колебаний электромагнитных радиоволн при их распространении от излучающего элемента антенны.

По сравнению с обычной одноантенной системой пропускная способность канала многоантенной системы с NT передатчиками и NR приемными антеннами может быть увеличена в несколько раз (NT, NR) без использования дополнительной мощности передачи или спектральной полосы пропускания. В связи с постоянно растущим спросом на более высокие скорости передачи данных в современных или будущих телекоммуникационных системах активно исследуются и успешно развертываются многочисленные антенные системы в новых широкополосных сетях беспроводного доступа (например, мобильный WiMAX).

Одной из основных идей, лежащих в основе беспроводных систем MIMO – пространственно-временная обработка сигналов, в которой время (естественное измерение цифровых данных связи) дополняется пространственным измерением, присущим использованию нескольких пространственно распределённых антенн, т.е. использованию нескольких антенн, расположенных в разных точках. Соответственно, системы MIMO можно рассматривать как логическое продолжение интеллектуальных антенн, которые уже много лет используются для

улучшения беспроводной связи. Между приёмником и передатчиком, сигнал может проходить через множество путей. Кроме того, при перемещении антенн даже на небольшое расстояние, используемые пути будут меняться. Разнообразие доступных путей возникает в результате количества объектов, которые появляются со стороны или даже в прямом пути между передатчиком и приёмником. Раньше эти множественные пути или так называемая многолучёвость служили только для введения помех. При использовании технологии ММО эти дополнительные пути могут быть применены с пользой. Они могут быть использованы для обеспечения дополнительной надёжности радиосвязи путём улучшения отношения сигнал/шум или увеличения пропускной способности канала передачи данных.

Например, есть два варианта систем, использующих технологию ММО.

1) Пространственное разнесение: в более узком смысле это часто относится к разнесению передачи и приёма. Эта методика используется для улучшения отношения сигнал/шум и характеризуется повышением надёжности системы в отношении различных форм затухания.

2) Пространственное мультиплексирование: эта форма ММО используется для обеспечения дополнительной пропускной способности данных путём использования различных путей для передачи дополнительного трафика, т.е. увеличения пропускной способности данных.

В результате использования нескольких антенн беспроводная технология ММО способна значительно увеличить пропускную способность данного канала, при этом соблюдая закон Шеннона. За счёт увеличения количества приёмных и передающих антенн можно линейно увеличить пропускную способность канала с каждой добавленной в систему парой антенн. Поскольку спектральная полоса пропускания становится всё более ценным ресурсом для систем радиосвязи, необходимы методы более эффективного использования имеющейся полосы пропускания, и технология ММО является одним из таких методов.

## 1.2 Закон Шеннона и пространственное разнесение

Как и во многих областях науки, существуют теоретические границы, за которые невозможно выйти. Это справедливо для объема данных, которые могут быть переданы по определённому каналу в присутствии шума. Закон, который управляет этим процессом, называется законом Шеннона. Это важно, так как технология ММО обеспечивает не метод нарушения закона, а увеличения скорости передачи данных сверх тех, которые возможны на одном канале без его использования.

Закон Шеннона определяет максимальную скорость, с которой безошибочные данные могут передаваться по заданной полосе пропускания в присутствии шума. Это обычно выражается в виде:

$$C = W \log_2(1 + S/N), \quad (1)$$

где  $C$  – пропускная способность канала,

$W$  – полоса пропускания в Герцах,

$S/N$  – отношение сигнал/шум.

Из этого видно, что существует предел пропускной способности канала с заданной полосой пропускания. Однако до достижения этой точки пропускная способность также ограничена отношением сигнал/шум принимаемого сигнала.

С учётом этих ограничений необходимо принять решение относительно того, каким образом осуществляется передача данных. Большую роль в этом может сыграть схема модуляции. Пропускная способность канала может быть увеличена с помощью схем модуляции более высокого порядка, но они требуют лучшего отношения сигнал / шум, чем схемы модуляции более низкого порядка. Таким образом, существует баланс между скоростью передачи данных и допустимой частотой ошибок, отношением сигнал / шум и мощностью, которая может быть передана. Хотя некоторые улучшения могут быть сделаны с точки зрения оптимизации, схемы модуляции и улучшения отношения сигнал / шум, эти

улучшения не всегда просты или дешевы, и они неизменно являются компромиссом, уравнивающим различные вовлеченные факторы. Поэтому необходимо рассмотреть другие способы повышения пропускной способности данных для отдельных каналов.

Методы разнесения основаны на предположении, что вероятность того, что несколько статистически независимых каналов затухания одновременно испытывают глубокое затухание, очень мала. Существуют различные способы реализации эффекта разнесения, в том числе следующие:

Пространственное разнесение - достаточно разделенные множественные антенны используются для реализации независимых беспроводных каналов (рисунок 2).

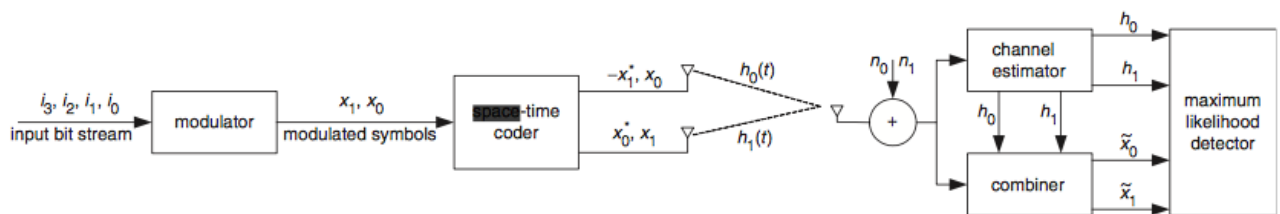


Рисунок 2 – Схема системы с пространственным разнесением, использующая две антенны

Поляризационное разнесение - независимые каналы реализуются с использованием того факта, что вертикально и горизонтально поляризованные пути независимы.

Разнесение во времени – одна и та же информация многократно передается в достаточно разнесенных временных инстанциях.

Частотное разнесение — одна и та же информация многократно передается в достаточно разнесенных частотных диапазонах.

Угловое разнесение - несколько приемных антенн с различной направленностью используются для приема одного и того же информационно-несущего сигнала под разными углами.

Методы временного, частотного и пространственного разнесения показаны на рисунке 3. Во временном разнообразии данные передаются через несколько временных интервалов. В частотном разнесении одни и те же данные передаются в нескольких спектральных диапазонах для достижения усиления разнесения, а в пространственном разнесении данные передаются с использованием нескольких антенн:

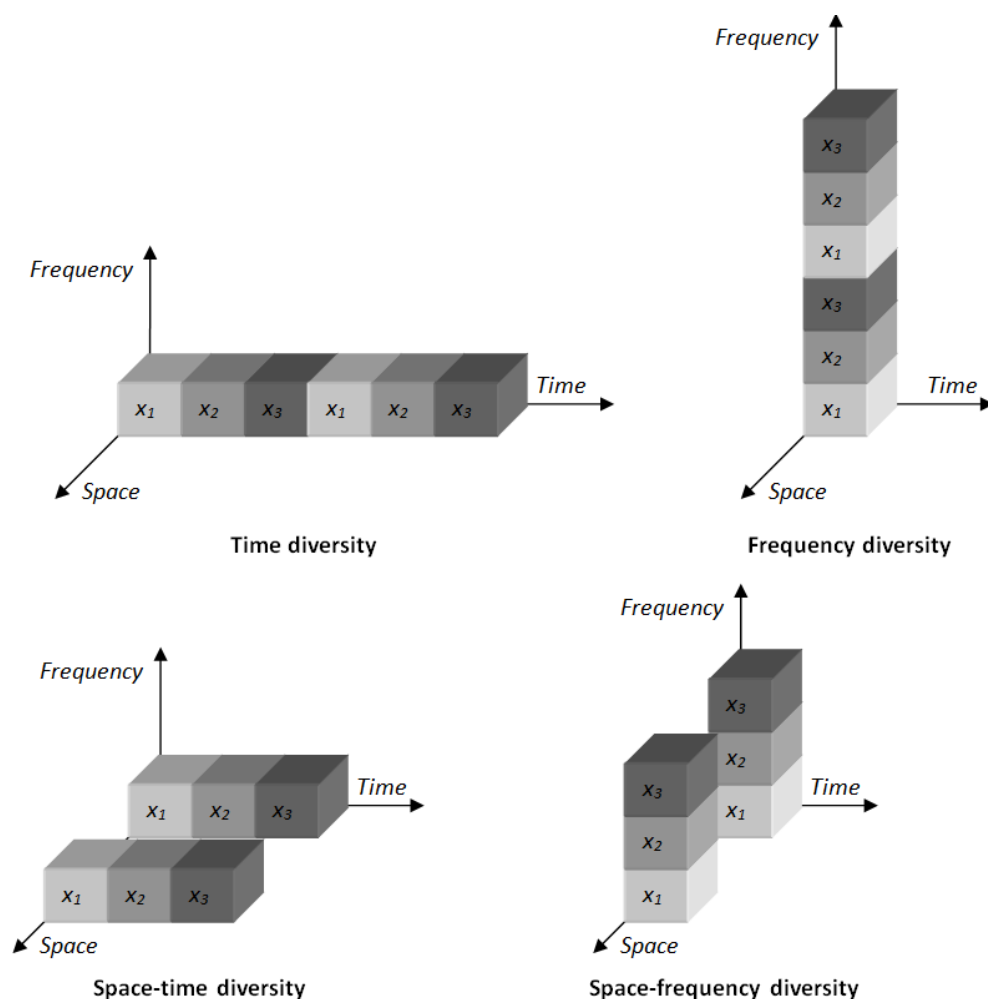


Рисунок 3 – Виды разнесения приёма

Чтобы воспользоваться преимуществами дополнительной пропускной способности, MIMO использует несколько наборов антенн. Во многих системах MIMO используются только две, но нет никаких причин, по которым дополнительные антенны не могут быть использованы, и это увеличивает пропускную способность. В любом случае для пространственного

мультиплексирования ММО количество приемных антенн должно быть равно или больше количества передающих антенн.

Чтобы воспользоваться преимуществами предлагаемой дополнительной пропускной способности, беспроводные системы ММО используют матричный математический подход. Поток данных  $t_1, t_2, \dots, t_n$  может передаваться с антенн  $1, 2, \dots, n$ . затем существует множество путей, которые можно использовать с каждым путем, имеющим различные свойства канала. Для того чтобы приемник мог различать различные потоки данных, это необходимо использовать. Таким образом, для трех передающих и трех приемных антенных систем может быть настроена матрица:

$$r_1 = h_{11} t_1 + h_{21} t_2 + h_{31} t_3$$

$$r_2 = h_{12} t_1 + h_{22} t_2 + h_{32} t_3$$

$$r_3 = h_{13} t_1 + h_{23} t_2 + h_{33} t_3$$

где  $r_1$  – сигнал, принятый антенной 1,

$r_2$  – сигнал, принятый антенной 2, и так далее.

В матричном виде это может быть представлено как:

$$[R] = [H] \times [T]$$

Для восстановления передаваемого потока данных на приемнике необходимо выполнить значительный объем обработки сигнала. Сначала декодер системы ММО должен оценить индивидуальную характеристику передачи канала  $h_{ij}$ , чтобы определить матрицу передачи канала. После того, как все это было оценено, затем была получена матрица  $[H]$  и переданные потоки данных могут быть восстановлены путем умножения принятого вектора на обратный передаточной матрице.

$$[T] = [H]^{-1} \times [R]$$



Этот процесс можно сравнить с решением множества  $N$  линейных одновременных уравнений для выявления значений  $N$  переменных.

На самом деле ситуация немного сложнее, поскольку распространение никогда не бывает таким простым, и в дополнение к этому каждая переменная состоит из непрерывного потока данных, что, тем не менее, демонстрирует основной принцип, лежащий в основе беспроводных систем ММО.

Для того чтобы можно было использовать пространственное мультиплексирование ММО, необходимо добавить кодирование к различным каналам, чтобы приемник мог обнаружить правильные данные.

Существуют различные формы используемой терминологии, включая пространственно-временной блочный код - STBC, ММО-прекодирование, ММО-кодирование и коды Аламоути [4].

### 1.3 Пространственно-временное блочное кодирование

Пространственно-временные блочные коды используются в системах ММО для обеспечения возможности передачи нескольких копий потока данных через ряд антенн и использования различных принятых версий данных для повышения надежности передачи данных. Пространственно-временное кодирование объединяет все копии принимаемого сигнала оптимальным образом, чтобы извлечь из каждой из них как можно больше информации.

Пространственно-временное блочное кодирование использует как пространственное, так и временное разнообразие и таким образом позволяет добиться значительных успехов.

Пространственно-временное кодирование предполагает передачу нескольких копий данных. Это помогает компенсировать проблемы канала, такие как замирание и тепловой шум. Несмотря на избыточность данных, некоторые копии могут поступать в приемник менее поврежденными.

При использовании пространственно-временного блочного кодирования поток данных перед передачей кодируется в блоках. Эти блоки данных затем распределяются между несколькими антеннами (которые расположены на расстоянии друг от друга, чтобы декоррелировать пути передачи), и данные также распределяются во времени.

Пространственно-временной блочный код обычно представлен матрицей. Каждая строка представляет собой временной интервал, а каждый столбец - передачу одной антенны с течением времени.



В этой матрице  $S_{ij}$  является модулированным символом, передаваемым во временном интервале  $i$  от антенны  $j$  существуют  $t$  временных интервалов и  $N_T$  передающих антенн, а также  $N_R$  приемных антенн. Этот блок обычно считается "длиной"  $T$ .

Дифференциальное пространственно-временное блочное кодирование — это форма пространственно-временного блочного кодирования, которая не нуждается в знании проблем канала для декодирования сигнала. Дифференциальные пространственно-временные блочные коды обычно основаны на более стандартных пространственно-временных блочных кодах. Один блок-код передается из набора в ответ на изменение входного сигнала. Это позволяет системе работать, потому что различия между блоками в наборе предназначены для того, чтобы приемник мог извлекать данные с хорошей надежностью [5].

Пространственно-временные блочные коды (STBC) являются обобщенной версией схемы Аламоути, но имеют те же ключевые особенности. Эти коды ортогональны и могут достигать полного разнесения передачи, заданного

количеством передающих антенн. Данные строятся в виде матрицы, столбцы которой равны числу передающих антенн, а строки-числу временных интервалов, необходимых для передачи данных. На стороне приемника полученные сигналы сначала объединяются, а затем передаются в детектор максимального правдоподобия, где применяются правила принятия решений.

Пространственно-временные блочные коды были разработаны для достижения максимального порядка разнесения для заданного числа передающих и приемных антенн при условии ограничения наличия простого алгоритма линейного декодирования.

Две антенны используются для передачи двух символов OFDM и их сопряжения в двух временных интервалах, что обеспечивает усиление разнесения без необходимости идти на компромисс по скорости передачи данных []. В эфире передаваемые символы будут страдать от замирания канала, и на приемнике будет получена их сумма. Схема беспроводной системы Alamouti в режиме  $2 \times 2$  MIMO представлена на рисунке 4.

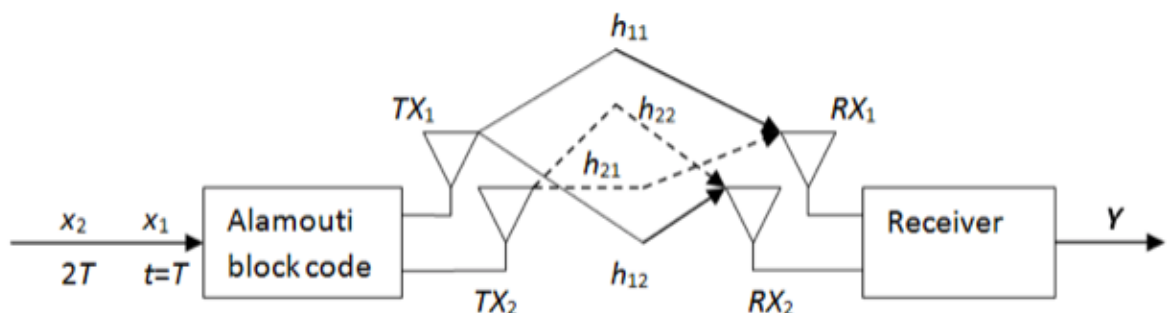


Рисунок 4 – Схема системы MIMO, использующая блочный код Аламоути

Поскольку передача осуществляется в течение двух периодов времени, декодирование также будет выполняться в течение двух периодов времени. В приемнике полученный вектор  $Y$  может быть представлен следующим уравнением:

$$\text{Equation Vector Y 1} \quad \begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \end{bmatrix}$$

Это для первого периода времени. Для второго периода времени уравнение выглядит следующим образом:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1^2 \\ y_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_2^* \\ x_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^2 \\ n_2^2 \end{bmatrix}$$

где  $\begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \end{bmatrix}$  представляет собой полученный символ OFDM в первый период времени, для антенн 1 и 2, соответственно, и где  $\begin{bmatrix} y_1^2 \\ y_2^2 \end{bmatrix}$  представляет собой полученный символ OFDM во втором периоде времени для антенн 1 и 2 соответственно. Оба уравнения могут быть легко объединены и упорядочены для получения следующего результата:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \\ y_1^{2*} \\ y_2^{2*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \\ n_1^{2*} \\ n_2^{2*} \end{bmatrix}$$

Следующий шаг - найти способ отделить передаваемые символы  $x_1$  и  $x_2$ . Одним из способов уменьшить число неизвестных является использование канальной оценки для оценки коэффициентов канала. Символы оценки канала OFDM передаются с каждым переданным пакетом, чтобы позволить оценить эти коэффициенты канала на приемнике. Учитывая следующую матрицу:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix}$$

Можно отделить  $X_1$  и  $X_2$ , просто умножив матрицу  $\mathbf{Y}$  на обратную от  $\mathbf{H}$ . Однако, поскольку эта матрица не является квадратной, нужно использовать псевдоинверсию Мура-Пенроуза  $\mathbf{H}^+$  для решения уравнений:

$$\mathbf{H}^+ = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H .$$

Используя это обратное матричное выражение, зашумленные оцененные передаваемые символы можно найти, используя следующее выражение:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \\ y_1^{2*} \\ y_2^{2*} \end{bmatrix}$$

Последним шагом будет принятие окончательного решения относительно передаваемых символов. Решение принимается на основе критерия минимального квадратного евклидова расстояния. На рисунке 5 можно увидеть, что добавление разнесения в систему приносит значительный прирост производительности с точки зрения коэффициента битовых ошибок при моделировании:

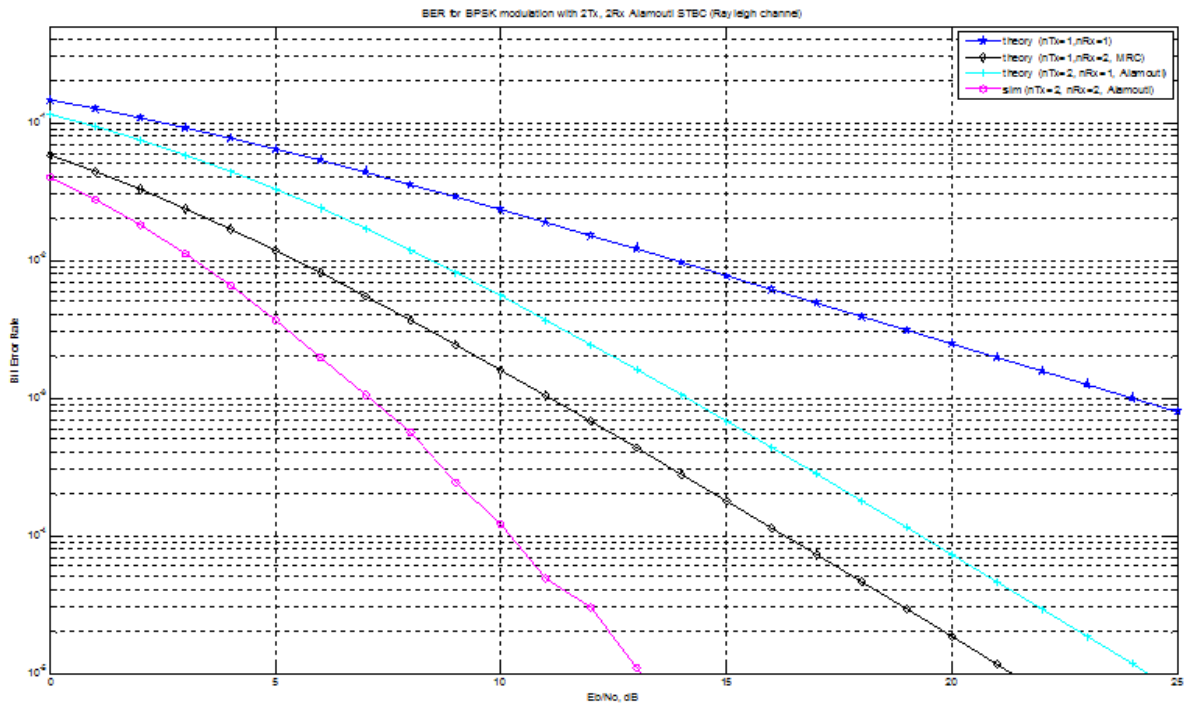


Рисунок 5 – Соотношение коэффициента битовых ошибок в зависимости от используемой системы

## 2 Моделирование

Рассмотренные теоретические материалы требуют эмпирического подтверждения. Модель использует кодирование по алгоритму Аламоути, две передающие и две приёмные антенны. Для подтверждения результатов предоставлены графики.

### 2.1 Канал связи использующий код АЛАМОУТИ

На рисунке 6 представлен канал связи, использующий кодирование по алгоритму Аламоути.

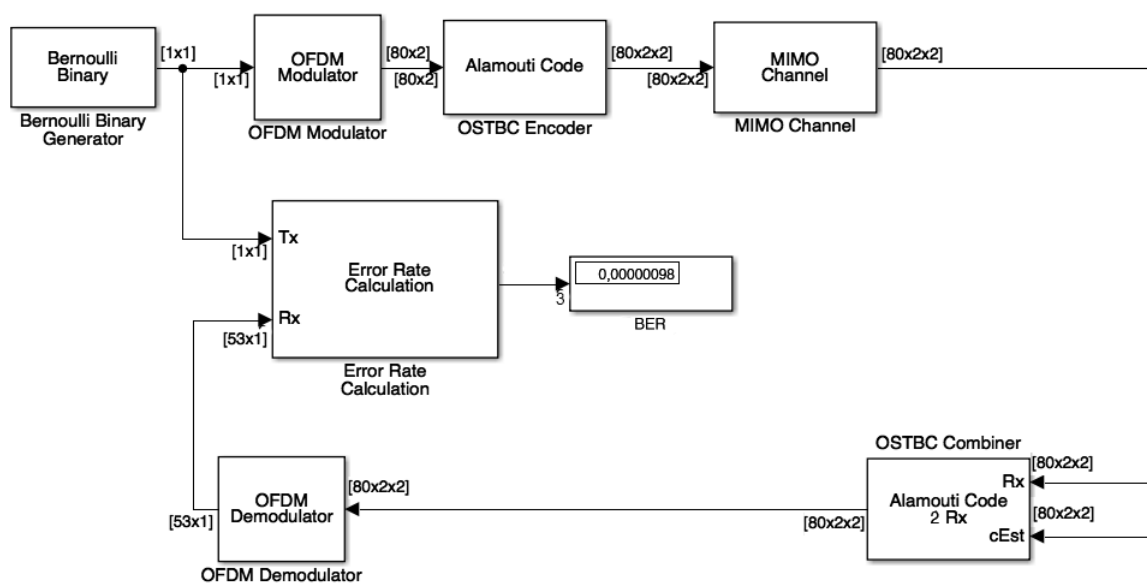


Рисунок 6 – Канал связи, использующий код Аламоути

Алгоритм работы исследуемой имитационной модели следующий: в качестве источника сигнала используется случайная двоичная последовательность, которая задаётся в блоке генератора двоичных чисел Бернулли (BernoulliBinaryGenerator). В его настройках задаётся вероятность появления нулей и единиц и частота дискретизации. Далее сигнал поступает в

модулятор с ортогональным частотным разделением каналов. На вход пространственно-временного блочного кодера Аламоути поступает промодулированный сигнал блоками по два символа, и он формирует матрицу по определённому закону, каждая строка которой поступает отдельно на передающие антенны. Блок MIMOchannel моделирует канал связи с помехами и Рэлеевским затуханием. В канал поступает сигнал с кодера, и он претерпевает многолучевое распространение. После сигнал поступает в пространственно-временной декодер, и переданная последовательность восстанавливается по определённому закону. Исходный и демодулированный сигнал поступает в блок вычисления ошибки, в котором формируется зависимость вероятности ошибочного приёма от величины отношения сигнал/шум.

### **Генератор двоичных чисел Бернулли (BernoulliBinaryGenerator)**

Данный блок генерирует случайные двоичные числа, используя распределение Бернулли. Распределение Бернулли моделирует случайный эксперимент произвольной природы, когда заранее известна вероятность успеха или неудачи. Для данного распределения вероятность единицы равна  $p$ , а нуля –  $1-p$ . Также распределение Бернулли имеет дисперсию, равную  $p(1-p)$ . Число  $p$  – любое вещественное число от нуля до единицы.

Выходным сигналом данного блока может быть столбец, вектор-строка или двумерная матрица.

На рисунке 7 представлено диалоговое окно блока генератора двоичных чисел Бернулли.



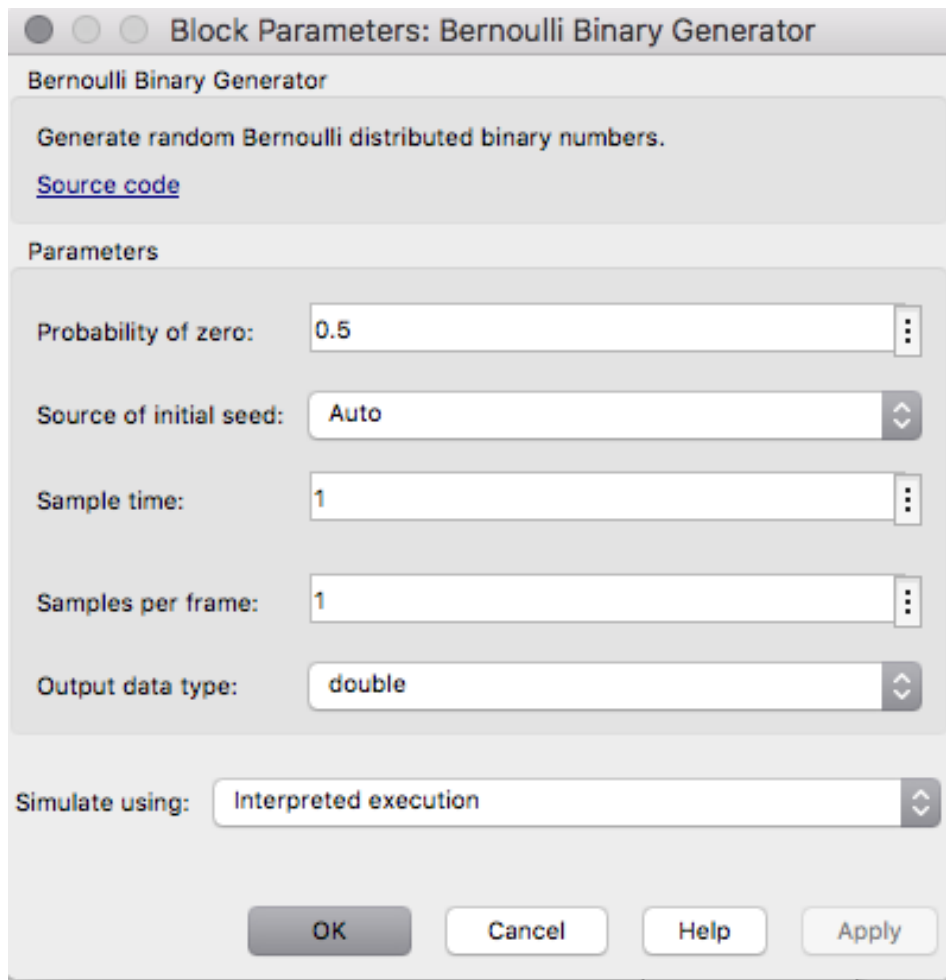


Рисунок 7 – Диалоговое окно блока генератора двоичных чисел Бернулли

### **Параметры блока генератора двоичных чисел Бернулли**

#### *1) Вероятность нуля (Probability of zero)*

Вероятность появления нуля на выходе. В данном поле можно указать вероятность в виде скалярного вектора или вектора строк, элементами которого являются вещественные числа от нуля до единицы. Число элементов в вероятности нулевого параметра соответствует числу независимых каналов, выводимых из блока.

#### *2) Первоначальный источник (Source of initial seed)*

Источник исходных данных для генератора случайных чисел. В поле указать источник как Auto или Parameter. При установке значения Auto блок использует глобальный поток случайных чисел. Начальное число для генератора случайных чисел должно быть указано как неотрицательный целочисленный

скаляр. Источник данных доступен, если для параметра Sourceofinitialseed задано значение Parameter.

3) *Время образца (sampletime)*

Время между каждой выборкой столбца выходного сигнала.

4) *Образцы на кадр (Sample per frame)*

Количество отсчетов на кадр в одном канале выходного сигнала.

Указываются образцы на кадр в виде положительного целочисленного скаляра.

5) *Тип выходных данных (outputdatatype)*

Тип вывода блока может быть задан как boolean, uint8, uint16, uint32, single или double. Значение по умолчанию – double. Одиночные выходы могут привести к различным результатам при сравнении с двойными выходами для одного и того же набора параметров.

6) *Моделировать с помощью (Simulateusing)*

В данном параметре выбирается режим моделирования.

7) *Режим генерации кода (Codegeneration)*

При первом запуске модели генерируется код. Если структура блока не изменяется, то при последующих запусках модели регенерации кода не происходят.

8) *Интерпретированное исполнение (Interpretedexecution)*

Запуск модели без генерации кода. Этот параметр приводит к более быстрому времени запуска, но может замедлить последующую производительность моделирования.

9) *OFDM модулятор (Мультиплексор с ортогональным частотным разделением каналов)*

OFDM модулятор – блок модулирующего сигнала, применяется ортогональная модуляция с частотным разделением каналов для входного сигнала. Блок принимает один или два источника данных в зависимости от состояния порта пилотного ввода (Pilotinputport).

На рисунке 8 представлено диалоговое окно данного блока.

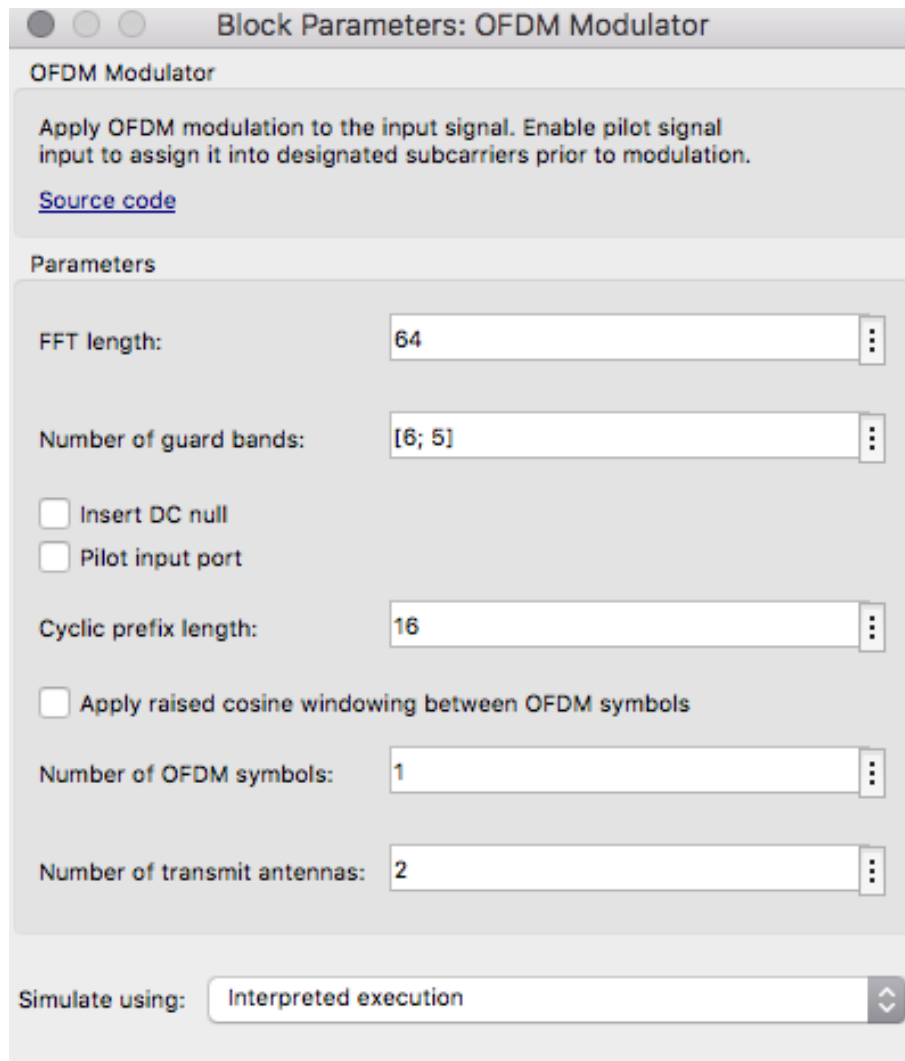


Рисунок 8 – Диалоговое окно ортогонального модулятора с частотным разнесением каналов

### **Параметры ортогонального модулятора с частотным разделением каналов**

#### *Длина быстрого преобразования Фурье (FFT Length)*

В данном параметре требуется указать длину быстрого преобразования Фурье, которая эквивалентна числу поднесущих. Длина быстрого преобразования Фурье должна быть больше или равна 8.

#### *Количество защитных интервалов (Number of guardboards)*

Указывается количество поднесущих для левой и правой защитных полос. Число поднесущих должно находиться в пределах  $[0, N_{FFT}/2-1]$ .

### *Порт пилотного ввода (Pilotinputport)*

Данный параметр выбирается для разрешения указания индексов пилотных поднесущих.

### *Длина циклического префикса (Cyclicprefixlength)*

В поле указывается длина циклического префикса. При задании скалярной величины длина префикса будет одинаковой для всех символов через все антенны. Если задаётся вектор строк, длина префикса может варьироваться по символам, но остается одинаковой для всех антенн.

### *Количество символов OFDM (Number of OFDM symbols)*

Указывается количество символов OFDM в частотно-временной сетке.

### *Количество передающих антенн (Number of transmit antennas)*

Указывается число передающих антенн,  $N_t$ , как положительное целое число, такое, что  $N_t \leq 64$ .

### *Ортогональный пространственно-блочный кодер (OSTBC Encoder)*

Блок кодирования OSTBC кодирует входную последовательность символов с помощью ортогонального пространственно-временного блочного кода (OSTBC). Блок отображает входные символы по блокам и объединяет выходные матрицы кодовых слов во временной области.

Блок поддерживает временные и пространственные домены для передачи OSTBC. Он также поддерживает дополнительное измерение, над которым вычисление кодировки не зависит. Это измерение можно рассматривать как частотную область. На рисунке 9 показаны поддерживаемые размеры для входов и выходов блока кодирования OSTBC.

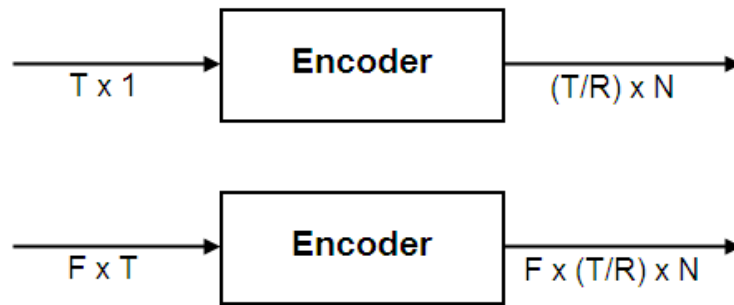


Рисунок 9 – Схема входов и выходов кодера

Эти переменные описаны далее:

- $F$  - дополнительное измерение; обычно это частотная область.

Кодировка не зависит от этого измерения;

- $T$  – длина последовательности входных символов для временной области;

- $R$  – символьная скорость кода;

- $N$  – число передающих антенн.

$F$  может быть любым положительным целым числом.  $N$  может быть 2, 3 или 4, обозначенных числом передающих антенн. Для  $N = 2$  значение  $R$  должно быть равно 1. Для  $N = 3$  или 4 значение  $R$  может быть равно  $3/4$  или  $1/2$ , что соответствует скорости. Длина временной области  $T$  должна быть кратна количеству символов в каждой матрице кодовых слов. В частности, при  $N = 2$  или  $R = 1/2$   $T$  должно быть кратно 2, а при  $R = 3/4$   $T$  должно быть кратно 3.

Выходной сигнал наследует тип кадра от входного сигнала. Входной вектор столбца требует либо фреймового, либо выборочного ввода; в противном случае входной сигнал должен быть основан на выборке.

Блок кодирования OSTBC поддерживает пять различных алгоритмов кодирования OSTBC. В зависимости от выбора скорости и количества передающих антенн блок реализует один из следующих алгоритмов: например, при двух передающих антеннах и скорости кода 1 матрица кодовых слов

ортогонального пространственно-временного блочного кода выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix}$$

На рисунке 10 представлено диалоговое окно блока кодирования:

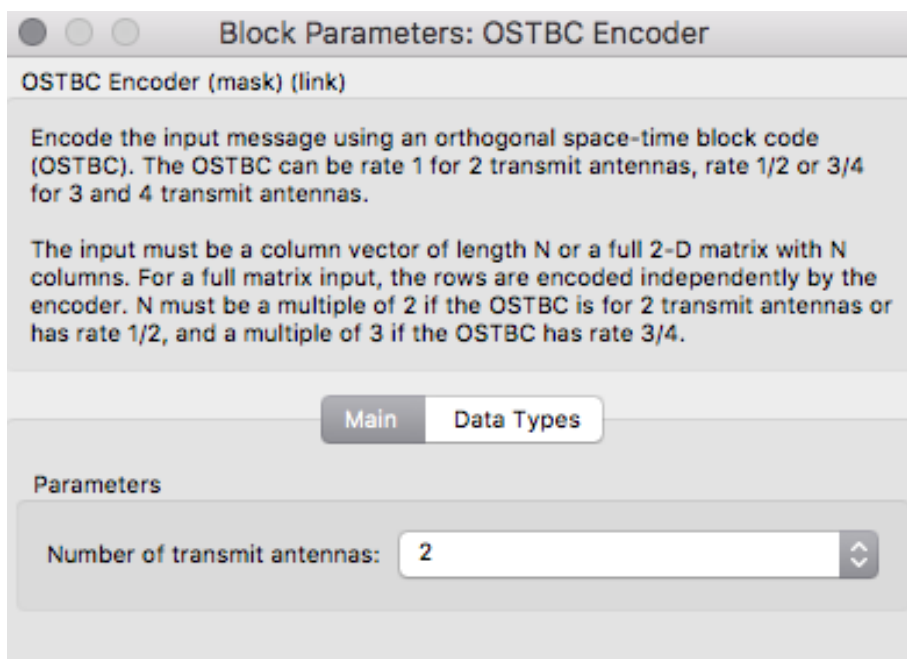


Рисунок 10 – Диалоговое окно кодера

## Параметры ортогонального пространственно-блочного кодера

### *Количество передающих антенн (Number of transmit antennas)*

Устанавливает количество антенн на стороне передатчика. Блок поддерживает 2, 3 или 4 передающие антенны. Значение по умолчанию равно 2.

### *Скорость кода*

Задаёт частоту символов кода. Указывается либо 3/4, либо 1/2. Это поле появляется только при использовании более 2 передающих антенн. Это поле по умолчанию равно 3/4 для более чем 2 передающих антенн. Для 2 передающих антенн нет опции скорости, и скорость по умолчанию равна 1.

### *Канал ММО*

Блок ММО канала фильтрует входной сигнал с помощью множественного ввода-вывода (ММО) – многолучевого канала с замираниями (рисунок 11).

Этот блок принимает до четырех входных портов. Когда устанавливается параметр выбора антенны в  $T_x$ , существует один дополнительный входной порт. Когда устанавливается параметр выбора антенны в  $R_x$ , существует один дополнительный входной порт. Когда устанавливается параметр выбора антенны на  $T_x$  и  $R_x$ , есть два дополнительных входных порта. Независимо от входных портов, вытекающих из параметров выбора антенны, при установке метода генерации параметров затухающих выборок на сумму синусоид и параметра источника начального времени на входной порт создается дополнительный входной порт. Когда устанавливается флажок усиление пути выходного канала, существует дополнительный выходной порт для усиления пути канала основного процесса замирания.

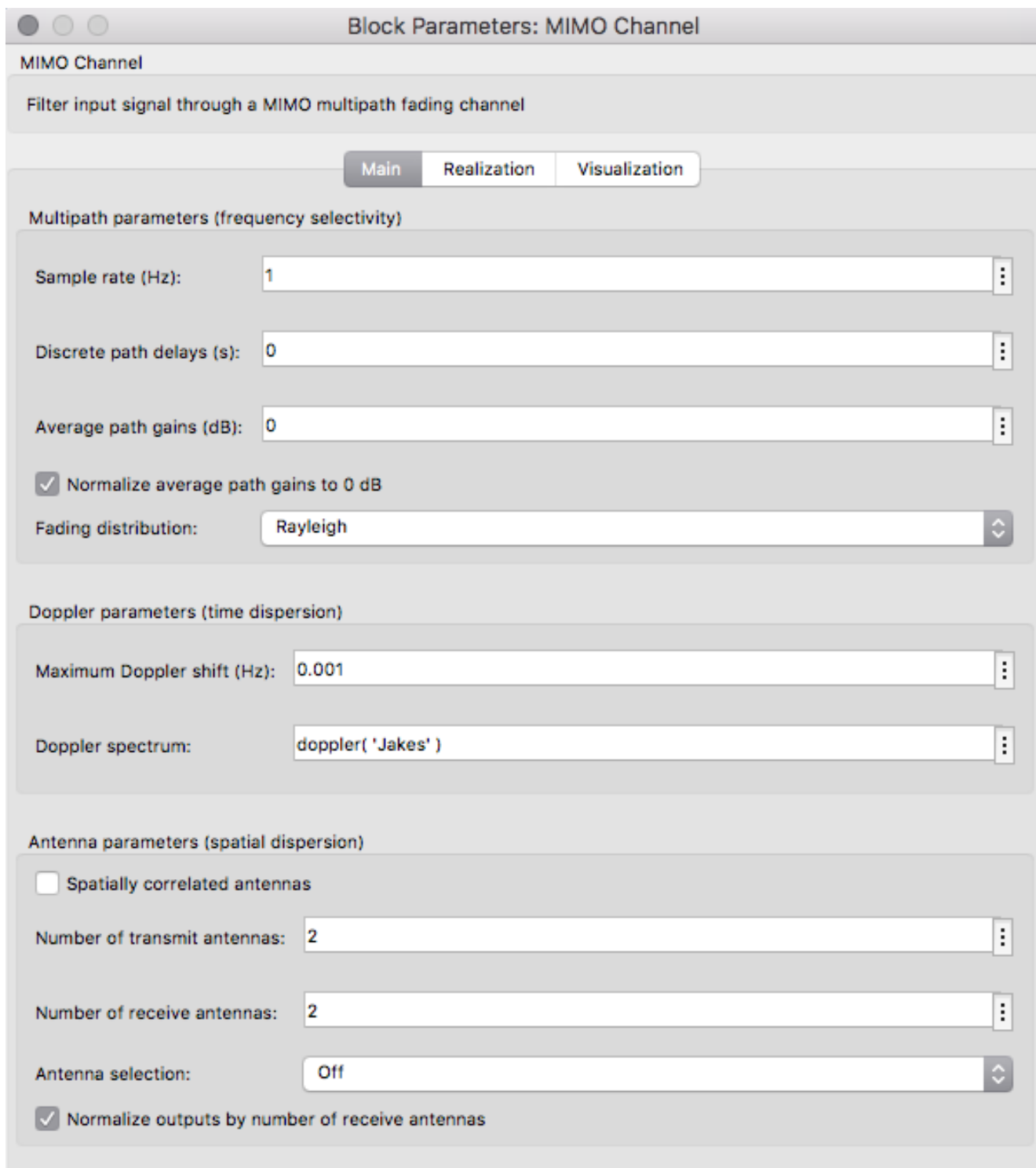


Рисунок 11 – Диалоговое окно блока канала ММО



## Параметры канала ММО

### 1) Частота дискретизации (*Samplerate*)

Указывается частота дискретизации входного сигнала в герцах в виде двойного прецизионного реального положительного скаляра. Значение этого параметра по умолчанию равно 1 Гц. Чтобы соответствовать настройкам модели, выбирается значение этого параметра таким образом, чтобы оно равнялось количеству строк входного сигнала, деленному на время выборки модели.

### 2) Дискретные задержки (*Discrete path delays*)

Задаются задержки дискретных путей в секундах в виде вектора двойной точности, вещественного, скалярного или строчного. Значение этого параметра по умолчанию равно 0. При установке дискретной задержки на скаляр системы ММО канала частота кватрира. Когда вы устанавливаете дискретные задержки пути к вектору, канал ММО является частотно-селективным.

### 3) Среднее усиление пути (*Average path gains*)

Указывается среднее значение усиления дискретных путей в децибелах в виде вектора двойной точности, вещественного, скалярного или строчного. Значение этого параметра по умолчанию равно 0. Среднее усиление пути должно иметь тот же размер, что и дискретные задержки пути.

### 4) Нормализовать среднее усиление пути до 0 дБ

Отмечается этот флажок, для нормализации процессов затухания таким образом, чтобы общая мощность усиления пути, усредненная по времени, составляла 0 дБ.

### 5) Распределение затухания (*Fading distribution*)

Выбирается распределение затухания канала как рэлеевское (Rayleigh) или рицианское (Rician). Выбор по умолчанию – рэлеевское.

### 6) Максимальное доплеровское смещение

Указывается максимальный доплеровский сдвиг для всех путей канала в герцах как действительный, неотрицательный скаляр. Значение этого параметра по умолчанию составляет 0,001 Гц.

Доплеровский сдвиг применяется ко всем путям канала. Когда этот параметр равен нулю, канал остается статичным для всего входного сигнала. Для доплеровского спектрального типа, отличного от гауссовского и Би-гауссовского, значение  $f_c$  равно 1. Для этих двух типов доплеровского спектра  $f_c$  зависит от поля структуры доплеровского спектра.

*7) Доплеровский спектр (Dopplerspectrum)*

Показывает форму доплеровского спектра для всех путей канала в виде одной структуры доплеровского спектра, возвращаемой из функции Доплера, или массива таких структур размером 1 на N ячеек. Значение этого параметра по умолчанию - доплеровский спектр Джейкса (JakesDopplerSpectrum). Этот параметр применяется, когда максимальное доплеровское смещение больше нуля. Также есть возможность выбора закругленного доплеровского спектра (roundeddopplerspectrum), Гауссовского и Би-Гауссовского.

*8) Количество передающих антенн (Number of transmit antennas)*

Указывается количество передающих антенн. Можно выбрать до восьми антенн.

*9) Количество приемных антенн (Number of receive antennas)*

Выбирается количество приемных антенн. Можно выбрать до восьми антенн. Эти параметры можно изменять, если убрать флажок с параметра «Пространственно-коррелированные антенны».

*10) Блок совмещения ортогонального пространственно-временного блочного кода (OSTBC Combiner)*

Блок комбинирования OSTBC объединяет входной сигнал (от всех приемных антенн) и сигнал оценки канала для извлечения мягкой информации символов, которые были закодированы с помощью OSTBC. Оценка входного канала может не быть постоянной во время каждой передачи блока кодовых слов, и алгоритм комбинирования использует только оценку для первого периода символа для каждого блока кодовых слов. Блок проводит операцию

комбинирования для каждого символа независимо. Алгоритм комбинирования зависит от структуры OSTBC.

Наряду с временными и пространственными областями для передачи блок декодирования ортогонального пространственного временного блочного кода поддерживает дополнительное измерение, над которым вычисление объединения не зависит. Это измерение можно рассматривать как частотную область для приложений на основе OFDM. На рисунке 12 показаны поддерживаемые размеры для входных и выходных данных блока комбинирования OSTBC.

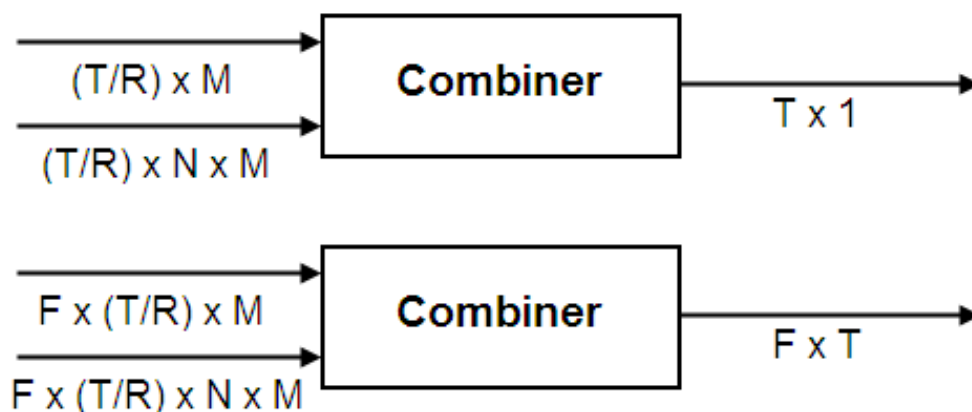


Рисунок 12 –Входные и выходные данные декодера

Используются следующие переменные:

- $F$  – дополнительное измерение; обычно это измерение частоты. Комбинированное вычисление не зависит от этого измерения;
- $N$  – количество передающих антенн.;  $M$  – количество приемных антенн;
- $T$  – длина последовательности выходных символов во временной области;
- $R$  – символьная скорость кода.

$F$  может быть любым положительным целым числом.  $M$  может быть от 1 до 8, что обозначается параметром количества приемных антенн.  $N$  может быть 2, 3 или 4, что обозначается параметром количество передающих антенн. Длина временной области  $T/R$  должна быть кратна длине блока кодового слова (2 для

кода Аламоути; 4 для всех других ортогональных пространственно-временных блочных кодов). Для  $N = 2$  T/R должно быть кратно 2. Когда  $N > 2$ , T/R должно быть кратно 4. R по умолчанию равен 1 для 2 антенн. R может быть либо 3/4, либо 1/2 для более чем 2 антенн.

Поддерживаемые размеры блока зависят от значений F и M. Для одной приемной антенны ( $M = 1$ ) вход принимаемого сигнала должен быть столбчатым вектором или полной двумерной матрицей, в зависимости от значения для частоты. Соответствующий вход оценки канала должен быть полной двумерной или трёхмерной матрицей.

Для более чем одной приемной антенны ( $M > 1$ ) вход принимаемого сигнала должен быть полной двумерной или трёхмерной матрицей, в зависимости от значения для частоты. соответственно, вход оценки канала должен быть трёхмерной матрицей, в зависимости от значения для частоты.

Алгоритмы комбинирования ортогональных пространственно-временных блочных кодов

Блок комбинирования OSTBC поддерживает пять различных алгоритмов вычисления комбинирования OSTBC. В зависимости от выбора скорости и количества передающих антенн можно выбрать один из алгоритмов. Для двух передающих антенн алгоритм выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\|H\|^2} \sum_{j=1}^M \begin{pmatrix} h_{1,j}^* r_{1,j} + h_{2,j}^* r_{2,j} \\ h_{2,j}^* r_{1,j} - h_{1,j}^* r_{2,j} \end{pmatrix}.$$

Схема потока сигналов для комбинирующего вычисления кода Аламоути с одной приемной антенной представлена на рисунке 13.

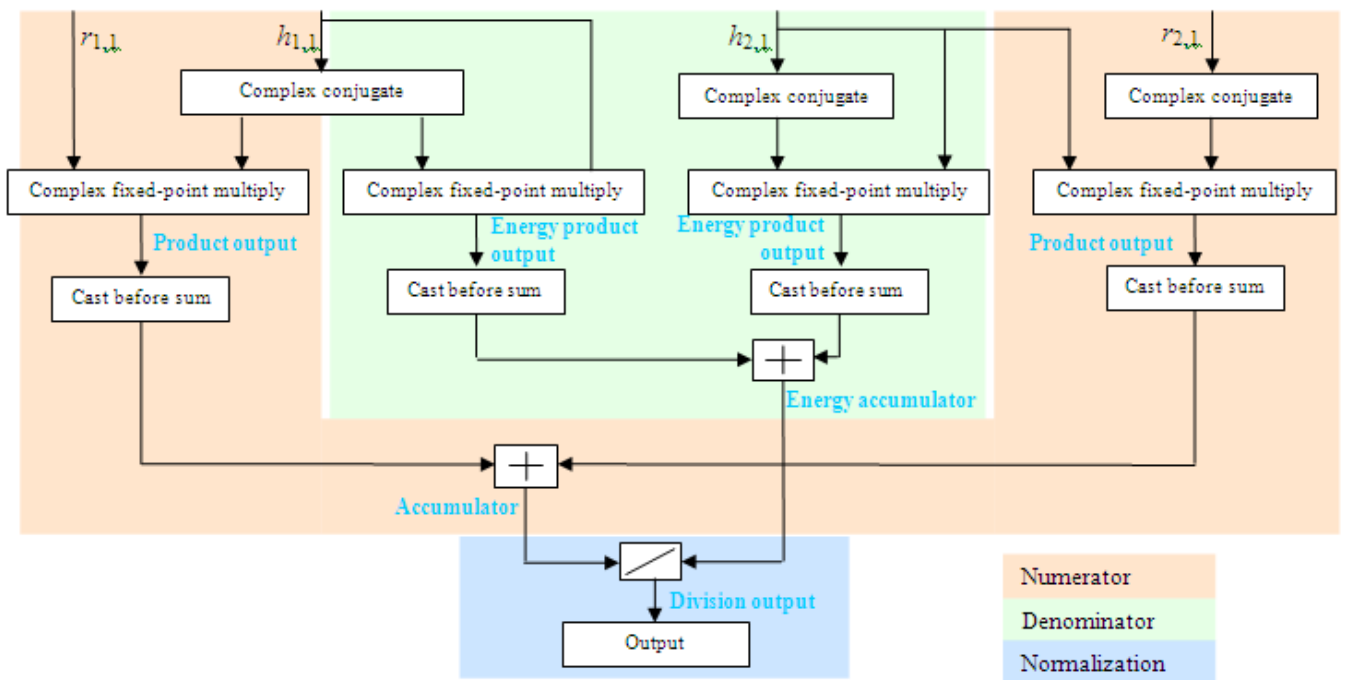
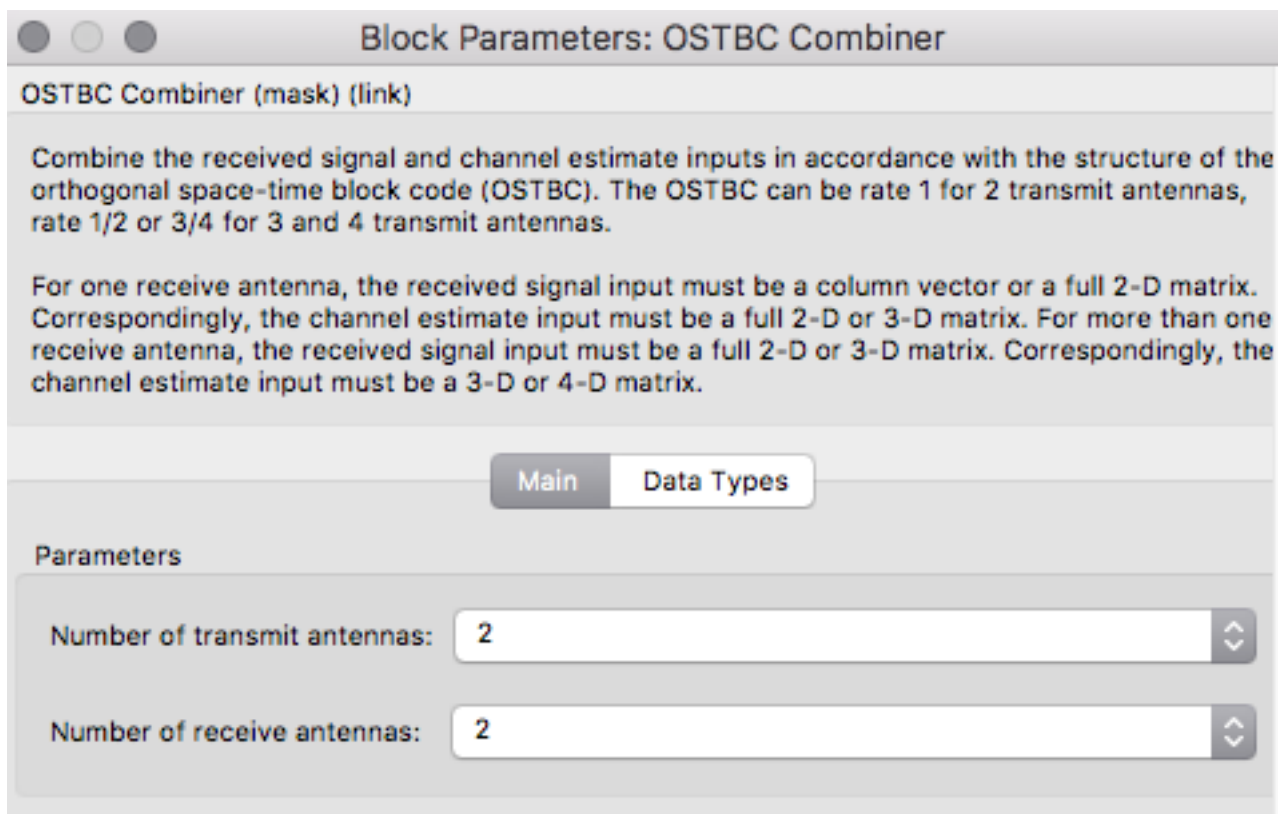


Рисунок 13 – Схема потоков сигналов для декодирования кода Аламоути

Диалоговое окно блока сумматора пространственно-временного блочного кода представлен на рисунке 14:



## Рисунок 14 – Диалоговое окно сумматора

### Параметры блока

#### *1) Количество передающих антенн (Number of transmit antennas)*

Устанавливает количество передающих антенн. Блок поддерживает 2, 3 или 4 передающие антенны. Это значение по умолчанию равно 2.

#### *2) Скорость кода (Rate)*

Задаёт частоту символов кода. Вы можете указать либо  $3/4$ , либо  $1/2$ . Это поле появляется только при использовании более 2 передающих антенн. Это поле по умолчанию равно  $3/4$  для более чем 2 передающих антенн. Для 2 передающих антенн нет опции скорости, и неявная (по умолчанию) скорость по умолчанию равна 1.

#### *3) Количество приемных антенн (Number of receive antennas)*

Количество антенн, используемых блоком для приема потоков сигналов. Блок поддерживает от 1 до 8 приемных антенн. Это значение по умолчанию равно 1.

#### *4) Демодулятор с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM Demodulator)*

Блок демодулятора ортогональной частотной модуляции (OFDM) демодулирует входной сигнал с ортогональным частотным уплотнением. Блок принимает один сигнал на входе и имеет один или два выходных порта, в зависимости от состояния пилотного выходного порта.

Диалоговое окно демодулятора показано на рисунке 15.

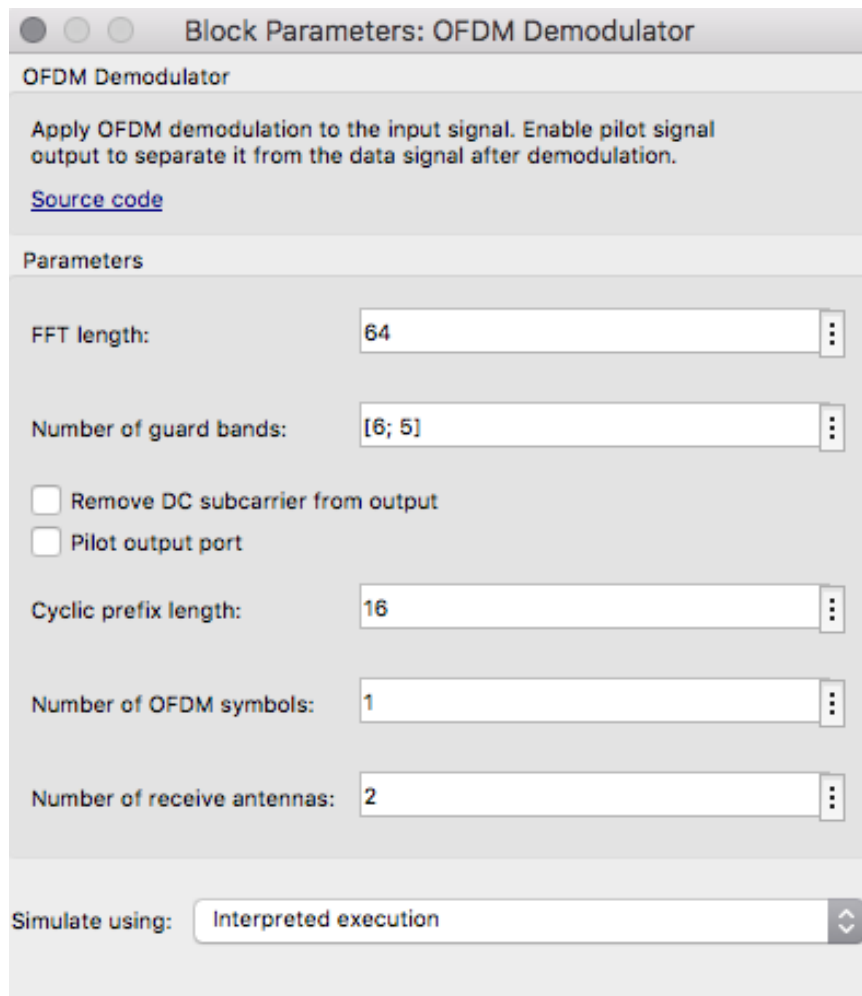


Рисунок 15 – Диалоговое окно демодулятора с ортогональным частотным уплотнением

### Параметры демодулятора

#### 1) Длина быстрого преобразования Фурье (*FFTlength*)

Выбирается длина быстрого преобразования Фурье (БПФ), которая эквивалентна количеству поднесущих. Длина БПФ должна быть больше или равна 8.

#### 2) Количество защитных интервалов (*Numberofguardboards*)

Указывается количество поднесущих для левой и правой защитных полос. Число поднесущих должно находиться в пределах  $[0, N_{FFT}/2-1]$ .

#### 3) Длина циклического префикса (*Cyclicprefixlength*)

В поле указывается длина циклического префикса. При задании скалярной величины длина префикса будет одинаковой для всех символов через все антенны. Если задаётся вектор строк, длина префикса может варьироваться по символам, но остается одинаковой для всех антенн.

4) *Количество символов OFDM (Number of OFDM symbols)*

Указывается количество символов OFDM в частотно-временной сетке.

5) *Количество передающих антенн (Number of transmit antennas)*

Указывается число передающих антенн,  $N_t$ , как положительное целое число, такое, что  $N_t \leq 64$ .

6) *Error rate calculation (Калькулятор ошибок)*

Блок расчета частоты ошибок сравнивает входные данные от передатчика с входными данными от приемника. Он вычисляет частоту ошибок в виде текущей статистики, деля общее число неравных пар элементов данных на общее число входных элементов данных из одного источника.

Этот блок используется для вычисления частоты ошибок символов или битов, поскольку он не учитывает величину разницы между элементами входных данных. Если входные данные являются битами, то блок вычисляет частоту битовых ошибок. Если входные данные являются символами, то он вычисляет частоту ошибок символов.

Диалоговое окно блока вычисления количества ошибок представлено на рисунке 16.



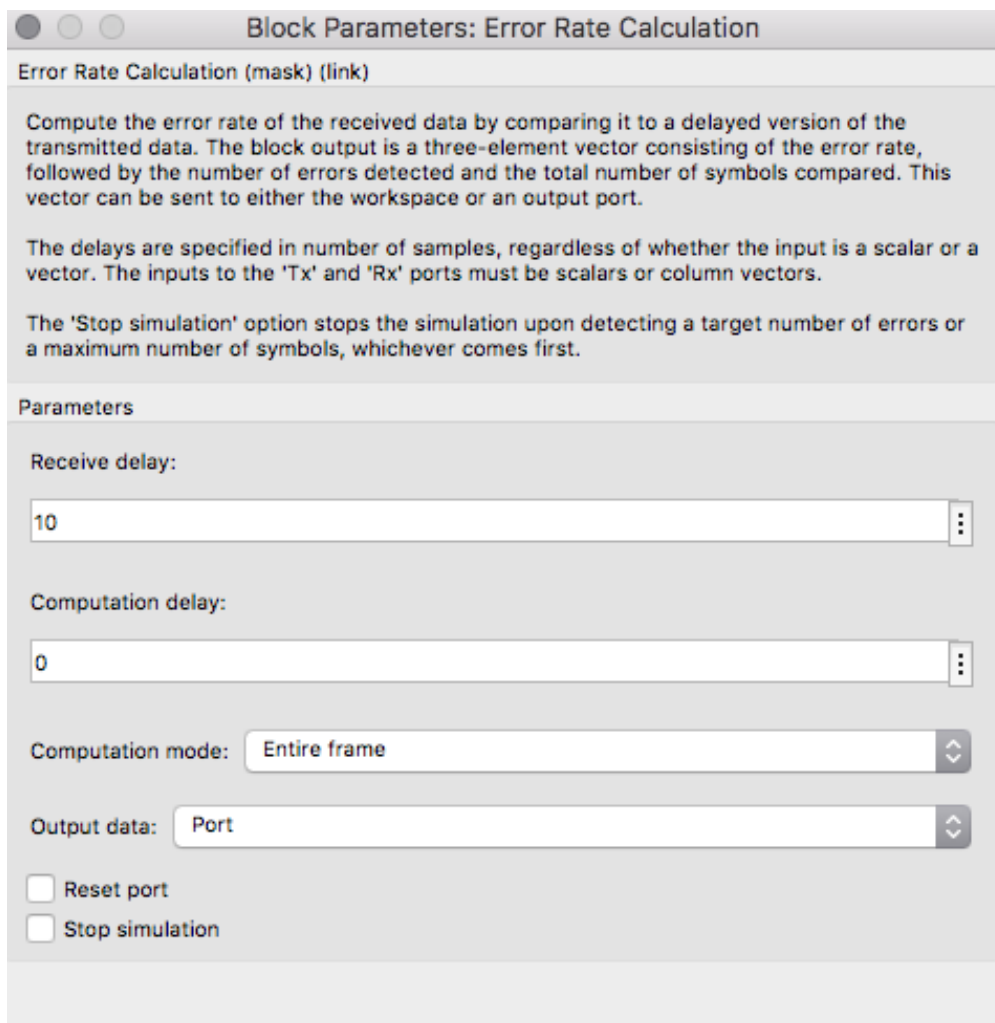


Рисунок 16 – Диалоговое окно блока расчета количества ошибок

## 2.2 Результаты моделирования

Было проведено исследование модели в двух вариантах – с одной приёмной антенной и двумя передающими и с двумя приёмными и передающими антеннами. Зависимость коэффициента битовых ошибок от отношения сигнал/шум в канале представлено на рисунке 17.

Из графика видно, что при одном и том же значении отношения сигнал/шум коэффициент битовых ошибок ниже при использовании системы с двумя приёмными и двумя передающими антеннами. Это значит, что кодек, работающий по схеме Аламоути более помехоустойчив при использовании технологии MIMO в стандартном варианте (2x2).

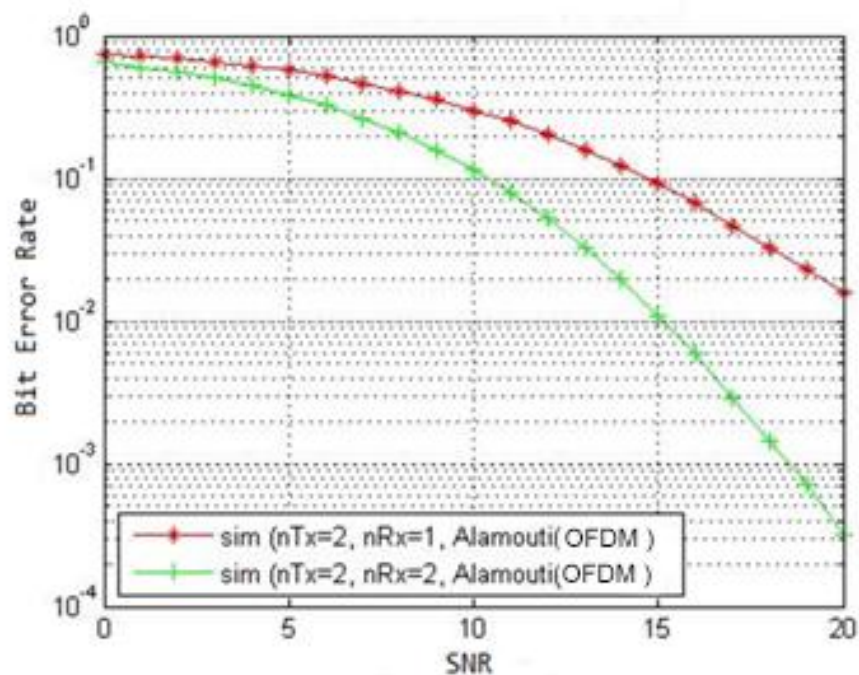


Рисунок 17 – График зависимости отношения вероятности битовых ошибок от отношения сигнал/шум

Результаты исследования представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Зависимость вероятности появления ошибки от величины отношения сигнал/шум при моделировании системы с двумя передающими и одной приёмной антенной

Параметр	SNR, дБ			
	5	10	15	20
BER	0,8	0,5	0,1	$25 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2 - Зависимость вероятности появления ошибки от величины отношения сигнал/шум при моделировании системы с двумя передающими и двумя приёмными антеннами

Параметр	SNR, дБ			
	5	10	15	20
BER	0,6	0,15	0,01	$6 \cdot 10^{-3}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы являлся обзор систем, использующих технологию ММО и исследование применяемых алгоритмов кодирования.

Реализованы следующие задачи:

- изучена и проанализирована литература по данным темам;
- проведён сравнительный анализ источников;
- ознакомление с методами кодирования и декодирования информации в многоантенных системах;
- разработана функциональная схема модели;
- определены параметры блоков, используемых в модели;
- сделаны выводы об эффективности многоантенных устройств, сравнение эффективности систем с двумя передающими и двумя приёмными антеннами (2x2) и двумя передающими и одной приёмной антенной (2x1). Результаты сравнения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение эффективности различных систем

SNR = 15 дБ	BER
Система 2x1	0,1
Система 2x2	0,01

Системы, использующие разнесённый приём и на входе, и на выходе, показывают большую помехоустойчивость, чем системы, использующие только одну приёмную антенну. Из этого можно сделать вывод, что системы, использующие технологию ММО менее уязвимы к воздействию помех и позволяют использовать меньшую мощность передающих устройств, не нарушая при этом качества сигнала.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бакулин М.Г. Технология MIMO: принципы и алгоритмы / М.Г. Бакулин, Л.А. Варукина, В.Б. Крейднделин – Горячая Линия – Телеком, 2014. – 242 с.
2. Yong Soo Cho MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB / Y.S. Cho – Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2010. – 431 с.
3. Hanzo, L. Near-Capacity Multi-Functional MIMO Systems / L. Hanzo, O. Alamri, M. El-Hajjar – John Wiley & Sons, 2009 – 738 с.
4. Horst, B. MIMO Signals and Systems / B. Horst. – Springer, 2005. – 185 с.
5. Rodriguez, B. Differential STBC for OFDM based Wireless Systems / B. Rodriguez – Göttingen: Culviller, 2007 – 237 с.
6. Шлома А.М. Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи / А.М. Шлома, М.Г. Бакулин – Горячая Линия – Телеком, 2008 – 344 с.
7. Деев, В.В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи / В.В. Деев. - СПб.: Наука, 2007. - 267 с.
8. Общая теория связи: учебное пособие / В. И. Нефедов, А. С. Сигов ; под ред. В. И. Нефедова. – М.: Юрайт, 2016. – 495 с.
9. СТО ЮУрГУ 19–2008 Стандарт организации. Выпускная квалификационная научно-исследовательская работа студента. Структура и правила оформления / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, С.Д. Ваулин, В.Р. Гофман. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 29 с.

