

На правах рукописи

Белоусова Екатерина Владиславовна

**Исследование методов оценки параметров канала в системах с OFDM  
модуляцией**

Направление подготовки 11.04.02

«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Профиль «Многоканальные телекоммуникационные системы»  
программа академической магистратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

магистерской диссертации

на соискание квалификации (степени) магистра

Екатеринбург 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ)

Научный руководитель, к.т.н., доцент кафедры МЭС

Д.В. Кусайкин

Рецензент

Защита состоится «30» июня 2020 г. в 9.00 часов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), г. Екатеринбург, ул. Репина, д. 15.

секретарь Государственной аттестационной комиссии

О.А. Шумилова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

Актуальность темы магистерской диссертации обусловлена необходимостью реализации программы «Цифровая экономика РФ», одним из направлений которой является развитие телекоммуникационных стандартов, обладающих рядом свойств, позволяющих удовлетворять тенденциям времени. OFDM является отличным решением для архитектур современных сетей, работающих в условиях мегаполиса. Технический прогресс и динамика рынка постоянно толкают производителей совершенствовать существующие технологии. В результате появляются устройства, использующие в своей основе различные модификации OFDM. Однако ядро и заложенные в него принципы остаются те же. В связи с этим весьма актуальной становится задача проведения исследования методов оценки параметров канала в системах с OFDM модуляцией.

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) – очень перспективная технология благодаря высокой пропускной способности передачи данных, высокой пропускной способности и ее надежности для многолучевой задержки. Помимо увеличения пропускной способности OFDM позволяет уменьшать негативные эффекты многолучевого распространения и межсимвольной интерференции. Это очень потенциальный способ передачи данных с высокой скоростью передачи данных по внутренним и внешним каналам беспроводной связи, и он уже используется в нескольких системах вещания и в стандартах беспроводной локальной сети.

Так как радиоканал является частотно-избирательным и изменяющимся во времени для широкополосных систем мобильной связи, поэтому для обеспечения обнаружения когерентного сигнала требуются надежные оценки канала. Они могут быть получены путем случайной передачи известных данных или так называемых «пилотных символов». Поскольку характер и параметры пилотных символов известны как приемником, так и передатчиком, коэффициент усиления канала и фазовое искажение могут быть легко получены из принятого сигнала со стороны приемника в положениях пилот-символа. Затем фильтрация или интерполяция информации канала между пилот-символами необходимы для получения оценки канала для сигналов данных.

Оценка канала может быть выполнена либо путем вставки тонов пилот-сигнала во всех поднесущих OFDM-символов с определенным периодом либо вставки тонов пилот-сигнала в каждом символе OFDM.

В последнее время разработано большое количество эффективных технологий в области телекоммуникаций. Они включают в себя и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). Как известно, в системах OFDM передаваемый поток данных делится на несколько низкоскоростных потоков, которые передаются на разных поднесущих.

Сегодня одним из важных требований к беспроводным телекоммуникационным системам является поддержка заданной скорости

передачи с абонентами, которые движутся с высокой скоростью. Это означает, что системы мобильной связи должны эффективно функционировать в условиях быстрых (высокочастотных) замираний. Кроме того, в городских условиях имеет место эффект многолучевого распространения сигнала. Часто из-за недостаточного разделения по времени составляющих сигнала, пришедших к приемнику разными путями (компонентов принимаемого сигнала при многолучевом распространении), их трудно различить и компенсировать. Неправильная оценка количества компонентов принимаемого сигнала при многолучевом распространении приводит к увеличению количества ошибок.

Для когерентного обнаружения принятых символов в системах с OFDM модуляцией необходимо оценить и скорректировать амплитудно-частотные характеристики каналов. Одним из методов оценки канала OFDM является оценка с помощью тестовых сигналов. Тестовые символы назначаются пилотным поднесущим, которые мультиплексируются с поднесущими переносящими данные, а полная оценка АЧХ канала строится с использованием методов интерполяции.

Для решения данной проблемы начали проводиться исследования, целью которых является нахождение лучшего метода оценки канала связи для систем с OFDM модуляцией. На основе анализа зарубежных публикаций представлен краткий обзор методов оценки канала связи для систем передачи данных по технологии OFDM: приводится краткое описание различных исследований по данной тематике и анализируются их результаты.

Актуальность темы магистерской диссертации обусловлена необходимостью реализации программы «Цифровая экономика РФ», одним из направлений которой является развитие телекоммуникационных стандартов, обладающих рядом свойств, позволяющих удовлетворять тенденциям времени. OFDM является отличным решением для архитектур современных сетей, работающих в условиях мегаполиса. Технический прогресс и динамика рынка постоянно толкают производителей совершенствовать существующие технологии. В результате появляются устройства, использующие в своей основе различные модификации OFDM. Однако ядро и заложенные в него принципы остаются те же. В связи с этим весьма актуальной становится задача проведения исследования методов оценки параметров канала в системах с OFDM модуляцией.

**Объект исследования** – системы с OFDM.

**Предмет исследования** – методы оценки параметров в системах OFDM.

**Целью работы** является исследование методов оценки АЧХ канала связи в системах OFDM.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

- 1) изучить оценку характеристик канала в системах с OFDM модуляцией на основе пилот-сигналов;
- 2) обзор и анализ методов интерполяции технологии OFDM;

3) изучить, как влияет погрешность метода интерполяции АЧХ канала связи при равномерном шаге тестовых поднесущих (с равномерным расстоянием друг от друга) на качество передачи сигнала в системах OFDM;

4) оценить характер искажений АЧХ в многолучевых каналах, каналах Релея.

**Научная новизна работы** заключается в исследовании эффективности оценки амплитудно-частотной характеристики канала связи в системах с OFDM модуляцией при использовании различных методов интерполяции.

**Практическая значимость** заключается в определении методов и их параметров, при которых обеспечивается наименьшее значение коэффициента ошибок в системах связи с OFDM модуляцией.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач моделирования, расчета и оценки результатов использовалась графическая среда программирования, моделирования и анализа MATLAB и встроенная в него специальная среда с блок-схемами для симуляции систем Simulink, что позволяет, подключать алгоритмы MATLAB к моделям, и экспортировать результаты симуляции в MATLAB для дальнейшего анализа. В качестве исследуемых методов используются метод тригонометрической интерполяции, метод интерполяции Лангража, метод интерполяции Котельникова и метод сплайн интерполяции.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) структурная схема системы передачи с OFDM модуляцией;
- 2) оценка характеристик канала в системах с OFDM модуляцией на основе пилот-сигналов;
- 3) схема модели системы передачи информации с OFDM модуляцией;
- 4) графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ);
- 5) графики зависимости BER и MSE от отношения сигнал/шум, от максимального доплеровского сдвига, от количества поднесущих для каждого метода.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием, при моделировании и исследовании, графическая среда программирования, моделирования и анализа MATLAB и встроенная в него специальная среда с блок-схемами для симуляции систем Simulink. Результаты исследования методов оценки АЧХ канала связи в системах OFDM и моделирование системы LTE на многолучевом канале Релея получены при разных методах и параметрах.

**Апробация результатов.**

1) материалы XXI научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, I этап «CommunicationchannelestimationmethodsforOFDMdatatransmissionsystem», г. Екатеринбург, 2019 г.;

2) материалы XXI научно-практической конференции студентов УрТИСИ СибГУТИ, I этап «Методы оценки канала на основе пилот – сигнала, размещенные в системах OFDM», г. Екатеринбург, 2019 г.;

3) «Методы оценки канала связи для системы передачи данных по технологии OFDM» Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования». Март 2020 г. №59, Часть 3 Изд. НИЦ «Л-Журнал», 2020. –104 с.

По теме диссертации опубликовано 1 научная работа, в том числе 1 статья в научных журналах РИНЦ, 2 статьи в сборниках и периодических изданиях УрТИСИ СибГУТИ. По теме диссертации опубликовано 4 отчета о НИР.

Диссертационная работа включает введение, три главы, заключение, список литературы из 30 наименований. Объем диссертации 93 страницы, включены также 54 рисунка, 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы магистерской диссертации, определены объект и предмет исследования, приведены цель и задачи работы, описаны научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе «Анализ публикаций»** проведен анализ публикаций по теме исследования, который позволил определить степень проработанности вопроса обеспечения качества услуги локального позиционирования мобильных систем. Изученные материалы отражают популярные направления развития исследований в данной области.

В результате анализа трудов таких авторов, как Джунхи Джао, Ран Ронг, Чанг Хеон, Д. Сео, Д.К. Ким, Амир Ханшан, Хакан Доган, Осман Сайли, Ердал Панаирси, П.Ф. Драйсен, Л. Ж. Гринштейн, Т.С.В. Шенк, С. Кайсер. Лонган Чен, Житонг Хуанг, Филипп Кибет Лангат, Д. Шонев, С. СИнанович, Андреас Фок, Томас Хауштейн Христофор Джушемс были сделаны выводы, подтверждающие актуальность темы магистерской диссертации.

Представленные достижения являются основополагающими в формировании выбора, в качестве исследования методов оценки АЧХ канала связи в системах OFDM.

**В второй главе «Оценка характеристик канала в системах с OFDM модуляцией на основе пилота – сигналов»** рассматривается оценка канала связи, ее алгоритм, Оценка канала для SISO (Single Input Single Output), оценка характеристик канала, а также анализ эффективности адаптивной схемы модуляции OFDM в сети автомобильной связи VLC в реалистичной шумовой среде.

Во всех коммуникациях сигнал проходит через среду (называемую каналом), и сигнал искажается, или различные сигналы добавляются к сигналу, в то время как сигнал проходит через канал. Чтобы правильно декодировать принятый сигнал без особых ошибок, нужно убрать искажения и помехи, вносимые каналом, из принятого сигнала. Для этого первым шагом является выяснение характеристик канала, через который прошел сигнал. Методика / процесс для характеристики канала называется «оценкой канала». Существует много разных способов оценки канала, но фундаментальные концепции схожи. Общий алгоритм оценки канала выглядит следующим образом:

- 1) Выстраивается набор предварительно определенного сигнала (это называется опорным сигналом)
- 2) Когда этот опорный сигнал проходит через канал, он искажается (ослабляется, сдвигается по фазе, зашумляется) вместе с другими сигналами.
- 3) Обнаруживается/декодируется принятый опорный сигнал на приемнике
- 4) Сравнивается переданный опорный сигнал и полученный опорный сигнал и находится корреляция между ними.

SISO (Single Input Single Output) – одноходовая передача с одним выходом (по одной антенне на приемной и передающей сторонах). Поскольку SISO это опорный символ, встраивается только в один порт антенны (порт 0). Вертикальная линия на карте ресурсов представляет собой частотную область. Поэтому проиндексирован каждый из опорных символов с помощью  $f_1, f_2, f_3 \dots f_n$ . Каждый опорный сигнал может представлять собой комплексное число (данные ввода-вывода), которое можно построить на графике. Каждое комплексное число (опорный символ) (сторона передачи) искажается до каждого соответствующего символа (полученный символ). Оценка канала – это процесс нахождения корреляции между массивом комплексных чисел слева и массивом комплексных чисел справа.

В случае 2x2 MIMO в LTE, каждый подкадр имеет различные местоположения для опорного сигнала для каждой антенны. Подкадр для антенны 0 передавал опорный сигнал, выделенный для антенны 0, и не передает никакого сигнала по опорному сигналу, выделенному для антенны 1. Подкадр для антенны 1 передавал опорный сигнал, выделенный для антенны 1 и не передает никакого сигнала по опорному сигналу, выделенному для антенны 0. Таким образом, если происходит декодирование на двух приемных антеннах, тогда ресурсные элементы, выделенные для опорного сигнала для антенны 0, можно оценить  $h_{11}, h_{12}$ . Если происходит декодирование на двух приемных антеннах, тогда ресурсные элементы, выделенные для опорного сигнала для антенны 1, можно оценить  $h_{21}, h_{22}$ . Данный процесс, заключается в измерении матрицы  $H$  для одной конкретной точки в частотной области в символе LTE OFDMA. Если применяется измеренное значение  $H$ , как это происходит в процессе декодирования других частей символа, точность декодированного символа может быть не так хороша, как это может быть, так как измеренные данные, используемые в предыдущем шаге, будут содержать некоторый уровень шума. Таким образом, в реальном применении некоторая постобработка применяется к значениям  $H$ , измеренным описанным выше методом, и в этой процедуре постобработки можно было бы выяснить общие статистические свойства шума (например, среднее, дисперсия и статистическое распределение шума). Однако следует иметь в виду, что конкретное значение шума, полученное в этом процессе, само по себе не имеет большого значения. Конкретное значение, полученное из опорного сигнала, не будет таким же, как значение шума для декодирования других данных (не опорный сигнал), поскольку значение шума изменяется случайным образом. Однако общие свойства этих случайных помех могут быть важной информацией (например, используемой в оценке SNR и многих других). Таким образом, при

измерении коэффициента канала было использовано оборудование, которое не имеет шумового термина.

Оптическая беспроводная связь (OWC) появилась в качестве мощного кандидата для беспроводной связи из-за ограничения пропускной способности в радиочастотном спектре. Особенно связь с видимым светом (VLC) имеет большой потенциал для наружной автомобильной связи ближнего действия, поскольку светодиодные фонари транспортных средств также передают данные. Однако внешние VLC-каналы быстро изменяются и испытывают многолучевое рассеяние и отражение, которое приводит к дисперсии во временной области. Внешние линии связи VLC также подвергаются высокому уровню шума окружающей среды, особенно от солнца. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), которое имеет доказанную устойчивость к замиранию многолучевого распространения и шумовым эффектам в радиочастотных линиях связи, также может быть развернуто в VLC линиях связи.

Оптический OFDM (O-OFDM) вместе со схемой адаптивной модуляции исследуется в VLC для связи между транспортными средствами (V2V). Рассматривается канал ( $2 \times 2$ ) множественного ввода с множественным выходом (MIMO) с множественными поляриметрическими двунаправленными отражениями и реалистичными солнечными помехами. Две схемы O-OFDM исследуют оптическое OFDM со смещением по постоянному току (DCO-OFDM) и асимметрично ограниченный оптический OFDM (ACO-OFDM). Результаты моделирования предлагаемой модели показывают увеличение скоростей передачи данных до 50 Мбит/с вместе со сниженной частотой битовых ошибок (BER) в условиях обеих линий прямой видимости (LOS) и не прямой видимости (NLOS) и высоких шумов.

Связь в видимом свете (VLC) становится привлекательной альтернативой радиочастотной (РЧ) беспроводной связи. Системы связи между транспортными средствами на основе VLC (V2V) и транспортными средствами к инфраструктуре (V2I) привлекли к себе повышенное внимание, в первую очередь благодаря быстрому развитию высокоинтенсивных светодиодных (LED) устройств в транспортных средствах, которые способны быстро переключаться и передавать данные в дополнение к освещению. Транспортные средства все чаще оснащаются датчиками изображения / видео, которые также могут функционировать как оптические приемники с некоторой модификацией. Поскольку передатчики и приемники VLC могут быть легко добавлены к современным транспортным средствам, подход на основе VLC обещает новый эпизод экономически эффективных коммуникаций V2V и V2I, особенно с широким распространением автономных транспортных средств и интеллектуальных транспортных систем (ITS), что повысит безопасность дорожного движения и обеспечит лучший транспортный поток.

Хотя оптический спектр имеет широкую полосу пропускания, каналы VLC обладают собственными свойствами рассеяния и отражения и подвергаются дисперсии из-за дисперсии многолучевого распространения. Это приводит к межсимвольным помехам (ISI), что приводит к низкой скорости передачи данных.



В большинстве предыдущих работ по оптической беспроводной связи рассматривалась внутренняя среда, которая квазистационарна и хорошо ограничена. Тем не менее, внешняя среда очень отличается. Это характеризуется коротким временем когерентного канала с движущимися транспортными средствами, высоким отражением от блестящих кузовов и высоким уровнем шума окружающей среды.

Для смягчения этих недостатков используется множество методов. Методы выравнивания во временной области (TDE) преобладают в системах с одной несущей. Мультиплексирование с кодовым разделением каналов (CDMA) и адаптивное подавление шума также были опробованы. Однако метод мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), который является усовершенствованным методом с несколькими несущими, может быть очень эффективным в каналах VLC.

OFDM оказался успешным во многих радиочастотных стандартах (например, IEEE 802.11, LTE, WiMAX) и проводных стандартах (например, DSL). Схемы оптического OFDM (O-OFDM) обещали иметь лучшую эффективность оптической мощности, пониженный ISI и очень низкий коэффициент ошибок по битам (BER) по сравнению с традиционными схемами оптической модуляции; такие как включение-выключение (OOK) и фазоимпульсная модуляция (PPM) [4]. OFDM также обеспечивает адаптивную глубину модуляции, широко называемую «загрузкой битов».

Следует отметить, что OFDM изначально был разработан для биполярных систем электросвязи, которые имеют как положительные, так и отрицательные составляющие сигнала. Чтобы сделать его подходящим для однополярной среды VLC, в литературе исследовано несколько методов, таких как оптический OFDM с постоянным током (DCO-OFDM) и асимметрично ограниченный оптический OFDM (ACO-OFDM).

Системы с множественным входом и множеством выходов (MIMO) получили значительное внимание в сетях VLC благодаря своим возможностям высокой скорости передачи данных на больших расстояниях. В дополнение к преодолению эффектов многолучевого замирания и помех метод MIMO может быть очень эффективным для уменьшения эффектов затенения, которые являются серьезными в оптическом мире из-за строгих свойств линии прямой видимости. Поэтому комбинация OFDM и MIMO может стать мощным решением физического уровня для высокоскоростных транспортных VLC-систем для приложений с высокой пропускной способностью.

Основная проблема наружной системы VLC - сильное влияние окружающего света. Дневной свет способствует получению немодулированного сигнала вместе с желаемым передаваемым сигналом. Этот шумовой сигнал составляет большую среднюю мощность, чем требуемый сигнал в дневное время даже при сильной оптической фильтрации. Следовательно, естественный свет, падающий на приемник, создает большое количество шума выстрела, который влияет на производительность системы. Соотношение сигнал/шум может быть очень низким или даже отрицательным.

Необходимо обратить внимание, что шум солнечного света является нестационарным и очень высоким по величине. Ранее были предложены различные способы шумоподавления, такие как подход к обработке сигналов на основе вейвлетов и аппаратный подход на основе дифференциального приемника. Однако, из-за сложной природы процесса, шумоподавление в реальном времени не было очень плодотворным.

Исходя из вышеизложенного, технология наружных VLC находится в начале своего развития и требует дальнейших исследований в нескольких областях, включая моделирование каналов, проектирование физического уровня и протоколы верхнего уровня.

Рассмотрено два подхода O-OFDM в присутствии солнечного света и отражателей. Насколько известно, это первый случай, когда практический внешний VLC-канал с реальным шумом солнечного света, шумом отсечения и множеством отражений рассматривается с O-OFDM модуляцией.

Предлагаемая система V2V на основе VLC состоит из двух транспортных средств, которые взаимодействуют друг с другом с помощью фар и оптических приемников, оснащенных задними фонарями. Фары первого транспортного средства действуют как передатчик. Так как каждый автомобиль имеет две передние фары и два задние фары, то можно рассматривать связь MIMO  $2 \times 2$ . Внешний канал VLC состоит из припаркованных и проезжающих транспортных средств, действующих как отражатели. Характеристики отражения поверхности отражателя зависят от ее характера и физического состояния, и изменяются в зависимости от погодных условий. Следовательно, поляриметрическая двунаправленная функция распределения отражений (BRDF) используется для моделирования отражателей. Модель BRDF может эффективно моделировать поляриметрические сигнатуры поверхности объекта; такие как краски или металл.

На рисунке 1 показана блок-схема предлагаемой оптической схемы OFDM для системы V2V на основе VLC.

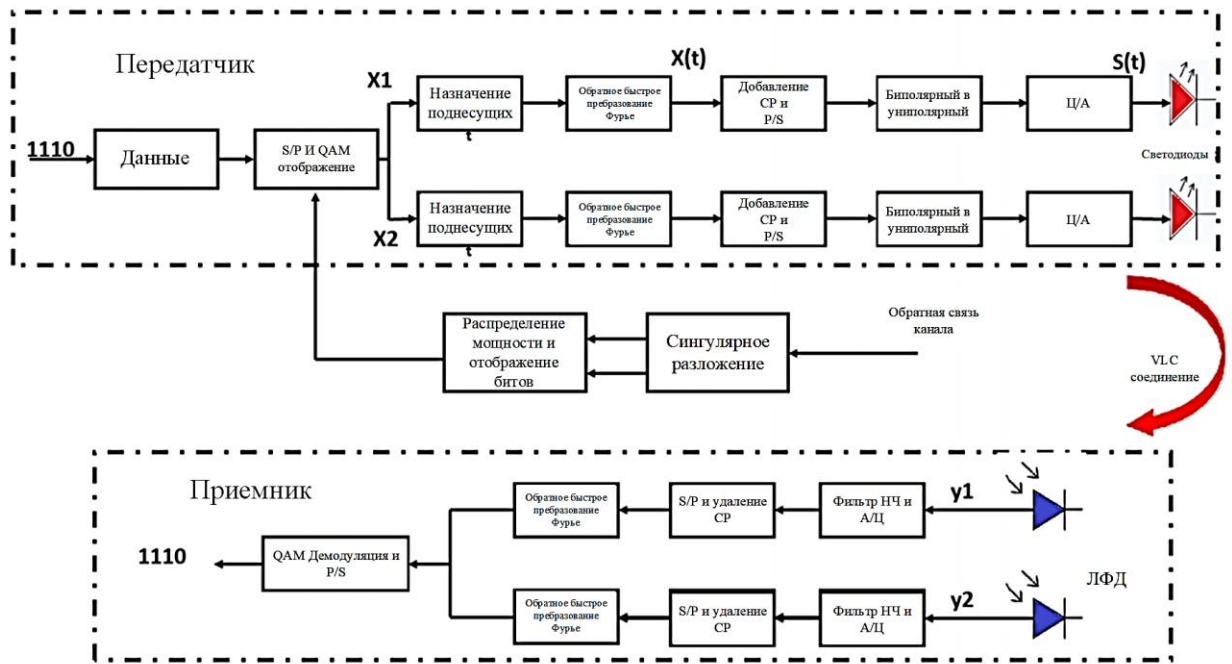


Рисунок 1 – Упрощенная схема OFDM для системы V2V на основе VLC

Последовательно-параллельный преобразователь (S/P) используется для разделения двоичного источника данных на два потока данных  $x_1$ ,  $x_2$ . Оба потока модулируются с использованием QAM, и результирующие символы назначаются поднесущим. После этого выполняется обратное быстрое преобразование Фурье (IFFT) и после добавления циклического префикса (CP) данные преобразуются обратно в один поток с использованием параллельно-последовательного преобразователя (P/S). После этого сигнал изменяется на однополярный с использованием одной из схем O-OFDM. Наконец, данные преобразуются в аналоговый сигнал с использованием цифроаналогового (Ц/А) преобразователя вместе с фильтром нижних частот (формирующим фильтром).

В методе DCO-OFDM данные назначаются как нечетным, так и четным поднесущим. Реальный сигнал может быть получен наложением свойства симметрии Эрмита. Данное свойство подразумевает, что только половина поднесущих OFDM может быть использована для генерации сигнала области реального времени. Поэтому системы VLC, на основе DCO-OFDM, могут использовать только половину заданного спектра. Благодаря теореме центрального предела, а также определению преобразования Фурье и тождества Эйлера,  $x(t)$  является гауссовой случайной переменной с нулевым средним и дисперсией.

Выходной сигнал Ц/А преобразователя является аналоговым сигналом реального времени. Этот сигнал нельзя использовать для прямой модуляции светодиодов из-за его биполярной природы. Определенное значение смещения добавляется к этому сигналу для преобразования его в однополярный. После этого любые оставшиеся отрицательные значения отсекаются на ноль. Следует отметить, что добавленное значение постоянного тока увеличивает потребность в мощности передатчика, в то время как ограничение вводит шум ограничения как

в четной, так и в нечетной поднесущих. Следовательно, оптимальное значение смещения должно быть принято для поддержания мощности передатчика и шума ограничения в приемлемых пределах.

В методе АСО-OFDM модулированные данные назначаются нечетным индексированным поднесущим, в то время как четные индексированные поднесущие устанавливаются в нуль. Сигналы в этой схеме передаются без какого-либо постоянного смещения. Благодаря теореме центрального предела, а также определению преобразования Фурье и тождеству Эйлера,  $x(t)$  является гауссовой случайной переменной с нулевым средним и дисперсией. В схеме АСО-OFDM биполярное преобразование в однополярное достигается путем удаления отрицательных амплитуд, что не приведет к каким-либо искажениям в передаче. Однако для смещения однополярного сигнала к динамическому диапазону светодиода необходимо добавить напряжение. Следовательно, любые уровни амплитуды, превышающие верхний предел динамического диапазона светодиодов, будут ограничены, таким образом, что приведет к другому типу шума отсечения. Спектральная эффективность АСО-OFDM снижается вдвое по сравнению с DCO-OFDM, поскольку при передаче используются только нечетные поднесущие.

В приемнике принятый сигнал состоит из передаваемого сигнала и шумового сигнала (состоящего из солнечного света и других источников шума). Предполагается, что передатчики и приемники находятся на одном горизонтальном уровне, но отражателей нет. В Лавинном фотодиоде фототок, обусловленный принимаемой оптической мощностью, состоит из двух компонентов, LOS компонента и NLOS компонента. Случайное попадание падающих фотонов как от светодиодов, так и от солнечного света приводит к появлению шума. Этот тип шума может быть смоделирован процессом Пуассона. Кроме того, когда число падающих фотонов велико, дробовой шум аппроксимируется гауссовым процессом (с использованием теоремы центрального предела).

Поскольку RF и VLC имеют совершенно разные системные настройки, ожидается, что оптимальная структура матрицы предварительного кодирования пользователя будет различной. Структура на основе SVD оптимальна для систем радиочастотной связи. Однако он не является оптимальным для связи VLC, особенно, когда используется большое количество светодиодов с требованием больших напряжений смещений. Тем не менее, поскольку предполагается небольшое количество светодиодов с минимальными требованиями смещения, метод SVD может быть использован для вычисления усиления каждой поднесущей. Структура SVD также практична для использования во многих аспектах. Он может распределять канал MIMO в набор параллельных каналов без помех. Схема предварительного кодирования SVD решает проблему корреляции каналов, которая может привести к низкому коэффициенту усиления пространственного мультиплексирования в MIMO в видимом свете. Поэтому каналы разлагаются на два независимых параллельных подканала.

Алгоритмы битовой загрузки рассматриваются для максимизации пропускной способности при ограничениях общей мощности и спектральной маски в системах OFDM. Поэтому поднесущие, имеющие высокое затухание, повторно модулируются с более низкими порядками модуляции. Аналогично, поднесущая, имеющая низкое затухание, повторно модулируется с более высокими порядками модуляции. Поднесущие сигнала O-OFDM модулируются с помощью M-QAM; порядок M созвездия отличается от других поднесущих на основе SNR.

Характеристики системы анализируются с учетом различных параметров для обоих типов схем O-OFDM. 128 QAM (7 бит/символ) назначается поднесущим, имеющим  $SNR \geq 14$  дБ, тогда как формат BPSK (1 бит/символ) выбирается для поднесущих, имеющих  $SNR = 7$  дБ (как видно с смещением 8 дБ) и без битов, назначенных для  $SNR < 7$  дБ. Шум ограничения уменьшается с увеличением смещения. Поэтому для смещения 10 дБ, поскольку шум ограничения меньше, суммарная мощность шума в большей степени зависит от частотной характеристики канала, а не от смещения 8 дБ. В результате смещения 8 дБ распределение битов уменьшается на два бита по 64 поднесущим. Происходит распределение мощности и порядок модуляции поднесущих, имеющих тенденции уменьшения в высокочастотном спектре. Причина такого поведения зависит от свойства низкочастотного светодиодного индикатора.

Производительность BER для обоих, ACO-OFDM и DCO-OFDM, исследуется для схем адаптивной и фиксированной модуляции. Также наблюдается, что схемы адаптивной модуляции могут достигать BER при меньшем значении SNR, чем другие схемы QAM. Рабочие характеристики BER не записываются для диапазона SNR (0-3 дБ) для ACO-OFDM и для диапазона SNR (0-7 дБ) улучшения рабочих характеристик (вместе с искажением отсечения) для обоих: DCO-OFDM, ACO-OFDM. Также выполняется сравнение производительности между фиксированными и адаптивными схемами модуляции, и для последних показано превосходство в терминах BER. Показано, что адаптивная схема DCO-OFDM имеет лучшую производительность скорости передачи данных, в то время как схема ACO-OFDM демонстрирует лучшие характеристики BER. Например, скорость передачи данных до 50 Мбит/с может быть достигнута с использованием схемы DCO-OFDM, когда целевая частота битовых ошибок  $= 10^{-5}$ .

**В третьей главе «Экспериментальная часть»** проведено построение имитационной модели системы передачи информации с OFDM модуляцией, исследовано влияние погрешности методов интерполяции АЧХ канала связи при равномерном шаге тестовых поднесущих на качество передачи сигнала в системах OFDM, проведена оценка характера искажений АЧХ в многолучевых каналах, каналах Релея, Райса.

На сегодняшний день имеется ряд компьютерных программ и средств моделирования OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). В настоящее время при исследовании параметров канала связи в системах с OFDM модуляцией стали активно применяться методы

имитационного моделирования. Для выбора программной среды были рассмотрены 3 компьютерные программы для моделирования, такие как Matlab+Simulink, LabVIEW и Mathcad. При выполнении работы возникла необходимость провести моделирование исследуемой системы. Для проведения желаемого моделирования было выбрано программное обеспечение MATLAB & Simulink. Данная программа поддерживает как английскую, так и русскую версию. Пример проведения моделирования представлен на рисунке 2.

На рисунке 2 представлена схема «Моделирование системы LTE на многолучевом канале Релея с использованием CRC (циклический избыточный код), турбо-кодера, 16-QAM, пилотов и OFDM, оцениваемого канала». Данная схема основана на турбо-кодировании, 16-QAM, OFDM и пилот сигналах (оценка канала). Описаны используемые блоки MATLAB Simulink

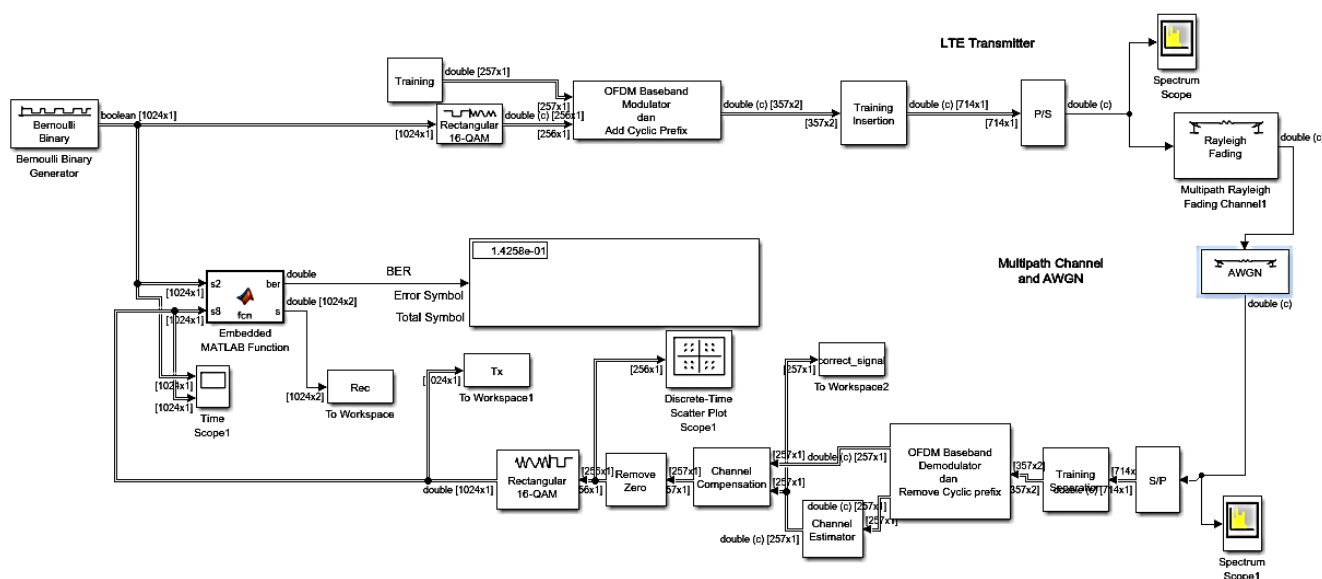


Рисунок 2 – Схема смоделированная в MATLAB Simulink

Для изучения влияния погрешности методов интерполяции АЧХ канала связи при равномерном шаге тестовых поднесущих на качество передачи сигнала в системах OFDM были рассмотрены пять методов:

- метод построения тригонометрического полинома по форме Лангража;
- метод тригонометрической интерполяции;
- метод сплайн интерполяции;
- метод интерполяции рядом Котельникова;
- метод интерполяции Ньютона.

Исследование было проведено для разных количеств поднесущих, таких как 24 поднесущие, 128 поднесущих, 256 поднесущих. Во время исследования необходимо вычислить и сравнить значение коэффициента ошибок (BER) и критерий оценки интерполяции (MSE) для каждого метода. Необходимо выяснить какой метод является самым оптимальным. В ходе проведения исследования в программной пакете MATLAB Simulink была использована экспериментальная схема «Моделирование системы LTE на многолучевом канале Релея с

использованием CRC, турбо-кодера, 16-QAM, пилот-сигналов и оценки канала на основе OFDM.

Результаты исследования показывают, что BER при изменении методов интерполяции изменяется. Метод Ньютона при 24 поднесущих является методом, обеспечивающим наименьшую ошибку. Но при 128 и 256 поднесущих BER сильно увеличился, и стал превышать допустимое значение для систем связи, что говорит о нецелесообразности применения этого метода интерполяции для рассматриваемой задачи. При 128 поднесущих методом, обеспечивающим наименьшую ошибку, является метод сплайн интерполяции. При 256 поднесущих методами, обеспечивающими наименьшую ошибку, являются три метода: метод построения тригонометрического полинома по форме Лангража, метод сплайн интерполяции и метод интерполяции рядом Котельникова. Так же значение BER во всех методах интерполяции изменяется при увеличении количества поднесущих с 24 до 128, а при увеличении количества поднесущих до 256 значение BER почти не изменяется по сравнению с изменением числа поднесущих с 24 до 128.

Для моделирования многолучевого канала была выбрана модель – канал Релея. Канал Релея соответствует случаю, когда нет прямой видимости и приём осуществляется только отраженных сигналов, схематично это показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Описание канала Релея

Для оценки характеристик искажений АЧХ в многолучевых каналах, каналах Релея, Райса были изменены параметры Maximum Doppler shift (Hz) (максимальное доплеровское смещение) и  $E_s/N_0$  (dB) (отношение сигнал/шум) в блоках Multipath Rayleigh Fading Channel1 и AWGN.

Максимальное доплеровское смещение менялось в пределах 0 - 100 Гц, а отношение сигнал/шум в пределах 17-23 дБ.

Так же было проведено исследование зависимости от данных параметров при разном количестве поднесущих.

По графикам и полученным значениям видно, что при изменении параметров Maximum Doppler shift (максимальный доплеровский сдвиг) и  $E_s/N_0$  (отношение сигнал/шум) меняется спектр сигнала, так же меняется значение коэффициента ошибок (BER). При увеличении доплеровского смещения значение BER увеличивается, при увеличении отношения сигнал шум, значение BER уменьшается. При изменении количества поднесущих так же изменяется и спектр сигнала, и значение коэффициента ошибок (BER). По графикам и полученным значениям видно, что при изменении параметров Maximum Doppler shift (максимальный доплеровский сдвиг) и  $E_s/N_0$  (отношение сигнал/шум) меняется спектр сигнала, так же меняется значение критерий оценки интерполяции (MSE). При увеличении доплеровского смещения значение MSE уменьшается, при увеличении отношения сигнал/шум значение MSE так же уменьшается. Аналогичные изменения происходят при использовании других методов интерполяции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации была достигнута поставленная цель – исследованы методы оценки АЧХ канала связи в системах OFDM.

Для достижения поставленной цели был решен ряд задач.

В первой главе данной исследовательской работы был проведен анализ многочисленных источников литературы, относящихся к проблеме оценки канала связи для систем передачи данных по технологии OFDM. В частности, были рассмотрены работы зарубежных авторов. По результатам данного анализа можно сделать вывод, что при оценке параметров канала связи в системах с OFDM модуляцией возникает множество задач, некоторые частные решения которых были рассмотрены различными исследователями. Часть задач по-прежнему остаются нерешенными. Поэтому тема диссертации «Исследование методов оценки параметров канала в системах с OFDM модуляцией» является актуальной. Совершенствование методов оценки канала является перспективным направлением для дальнейших исследований.

Во второй главе были рассмотрены теоретические аспекты оценки канала связи в системах с OFDM, проведен анализ эффективности адаптивной схемы модуляции OFDM в сети автомобильной связи VLC в реалистичной шумовой среде. Существуют две схемы O-OFDM, которые исследуют оптическое OFDM: со смещением по постоянному току (DCO-OFDM) и асимметрично ограниченный оптический OFDM (ACO-OFDM). Производительность BER для обеих, ACOOFDM и DCO-OFDM, исследуется для схем адаптивной и фиксированной модуляции. Показано, что адаптивная схема DCO-OFDM имеет лучшую производительность скорости передачи данных, в то время как схема ACO-OFDM демонстрирует лучшие характеристики BER.



В третьей главе в ходе проведения исследования в программной пакете MATLAB Simulink была использована экспериментальная схема «Моделирование системы LTE на многолучевом канале Релея с использованием 16-QAM, пилот-сигналов и оценки канала на основе OFDM».

Результаты исследования показывают, что BER при изменении методов интерполяции изменяется. Метод Ньютона при 24 поднесущих является методом, обеспечивающим наименьшую ошибку. Но при 128 и 256 поднесущих BER сильно увеличился, и стал превышать допустимое значение для систем связи, что говорит о нецелесообразности применения этого метода интерполяции для рассматриваемой задачи. При 128 поднесущих методом, обеспечивающим наименьшую ошибку, является метод сплайн интерполяции. При 256 поднесущих методами, обеспечивающими наименьшую ошибку, являются три метода: метод построения тригонометрического полинома по форме Лангража, метод сплайн интерполяции и метод интерполяции рядом Котельникова. Так же значение BER во всех методах интерполяции изменяется при увеличении количества поднесущих с 24 до 128, а при увеличении количества поднесущих до 256 значение BER почти не изменяется по сравнению с изменением числа поднесущих с 24 до 128.

По графикам и полученным значениям в таблице 3.2 видно, что при изменении параметров Maximum Doppler shift (максимальный доплеровский сдвиг) и  $E_s/N_0$  (отношение сигнал/шум) меняется спектр сигнала, так же меняется значение коэффициента ошибок (BER). При увеличении доплеровского смещения значение BER увеличивается, при увеличении отношения сигнал шум, значение BER уменьшается. При изменении количества поднесущих так же изменяется и спектр сигнала, и значение коэффициента ошибок (BER). По графикам и полученным значениям в таблице 3.3 видно, что при изменении параметров Maximum Doppler shift (максимальный доплеровский сдвиг) и  $E_s/N_0$  (отношение сигнал/шум) меняется спектр сигнала, так же меняется значение критерий оценки интерполяции (MSE). При увеличении доплеровского смещения значение MSE уменьшается, при увеличении отношения сигнал/шум значение MSE так же уменьшается. Аналогичные изменения происходят при использовании других методов интерполяции.

### **Основные теоретические и практические результаты работы.**

Научная значимость работы заключается в исследовании эффективности оценки амплитудно-частотной характеристики канала связи в системах с OFDM модуляцией при использовании различных методов интерполяции. Практическая ценность ожидаемых результатов заключается в определении методов и их параметров, при которых обеспечивается наименьшее значение коэффициента ошибок в системах связи с OFDM модуляцией.

Практическая значимость заключается в определении методов и их параметров, при которых обеспечивается наименьшее значение коэффициента ошибок в системах связи с OFDM модуляцией.

Возможно, адаптировать и использовать материал в опытно-конструкторских разработках систем передачи с OFDM модуляцией, а также в

рамках лекционных курсов для аспирантов и магистрантов соответствующего профиля.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях перечня РИНЦ**

1 Белоусова Е.В. Методы оценки канала связи для системы передачи данных по технологии OFDM / Е.В. Белоусова, Д.В. Кусайкин // Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования». Март 2020 г. №59, Часть 3 Изд. НИЦ «Л-Журнал», 2020. –104 с.

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях УрТИСИ СибГУТИ**

1 Белоусова Е.В. Методы оценки канала на основе пилот-сигнала, размещенные в системах OFDM / Е.В. Белоусова, Д.В. Кусайкин // Цифровая экономика: взгляд студенчества. – I этап – Екатеринбург, 2019.

2 Белоусова Е.В. Communication channel estimation methods for OFDM data transmission system / Е.В. Белоусова, Р.Г. Новокшенова // Цифровая экономика: взгляд студенчества. – I этап – Екатеринбург, 2019.