

На правах рукописи



Слипенчук Кристина Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ
ОЦЕНИВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ OFDM В КАНАЛАХ
С ПАМЯТЬЮ**

Специальность: 05.12.13 —
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара — 2020

Работа выполнена на кафедре информационной безопасности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ).

**Научный
руководитель:**

Карташевский Вячеслав Григорьевич
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Кузнецов Игорь Васильевич
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Телекоммуникационные системы»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Уфимский государственный авиационный
технический университет», г. Уфа.

Козлов Сергей Владимирович
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникацион-
ные системы» Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Казанский национальный исследова-
тельский технический университет им. А.Н.Туполева -
КАИ», г. Казань.

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»,
г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 2 июля 2020 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГУТИ и на сайте:
https://www.psuti.ru/ru/science/dissertation_councils/announcements.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 219.003.02,
доктор технических наук,
доцент



Гребешков Александр Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С повышением требований к доступности услуг связи в любом месте и в любое время беспроводная связь стала одним из крупнейших и быстроразвивающихся секторов телекоммуникаций. Планируется в ближайшее время значительный рост скорости передачи данных по беспроводным сетям связи. В новом технологическом стандарте мобильной связи 5G для потребителей скорость передачи информации достигнет 1-2 Гбит/с. Технология 5G предполагает высокий рост использования интернета вещей и воспроизведение сверхчеткого видео.

С постоянным приростом количества пользователей услуг связи современные системы связи должны обеспечивать с высокой достоверностью прием информации в сложной помеховой обстановке. Высокое качество работы системы связи должно осуществляться при больших скоростях передачи информации. В системах беспроводной связи 4G, 5G применяются технологии параллельной передачи информации на нескольких поднесущих за счет простых алгоритмов реализации. К такой технологии относится система ортогонального частотного мультиплексирования (Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM).

Технология OFDM делает возможным подключение одновременно к сети большого числа абонентов в одном частотном диапазоне.

Однако в каналах с памятью (временным рассеянием), обусловленной многолучевым распространением радиоволн и приводящей к межсимвольной интерференции, помехоустойчивость приема сигналов OFDM резко падает.

Для борьбы с межсимвольной интерференцией (МСИ) в традиционных системах OFDM увеличивается длительность канального символа за счет добавления защитных интервалов между соседними OFDM-символами, что позволяет сохранить ортогональность поднесущих на интервале обработки канального символа. При этом спектральная эффективность традиционной системы OFDM снижается.

Повысить спектральную эффективность возможно за счет использования предложенных в работе методов формирования новой структуры канального сигнала, применения алгоритмов приема сообщений, основанных на принципах «приема «в целом». При этом для организации когерентной обработки требуется знание параметров канала в месте приема.

Таким образом, исследование и разработка алгоритмов оценивания импульсной характеристики системы OFDM в каналах с памятью является актуальной темой.

Степень разработанности темы исследований. Изначально в теории оптимальных методов приема сообщений основные результаты получены для каналов без памяти при полной априорной информации о свойствах канала связи. Теория, основанная Котельниковым В.А., была развита в работах Велло Ф., Возенкрафта Дж., Кайласа Т., Кловского Д.Д., Турина Дж., Финка Л.М. и других ученых.

Когда память канала стала серьезным препятствием помехоустойчивости передачи сообщений, разработки многих ученых были направлены на поиск

структуры сигнала, при которой память канала существенно не проявляется. Однако, с точки зрения теории статистических выводов, подобные подходы не являются оптимальными.

Наиболее значимые результаты по разработке алгоритмов обработки сигналов в каналах с памятью были получены для так называемых «последовательных» систем передачи дискретных сообщений.

Метод последовательной передачи дискретных сообщений по стохастическим каналам с памятью» был впервые рассмотрен в отечественных трудах Кловским Д.Д. и в зарубежных трудах Хелстромом К. Проблемы оптимального приёма в каналах с памятью при последовательном способе передачи дискретных сообщений были рассмотрены в работах Абенда К., Витерби А., Кловского Д.Д., Омур Д.Д., Фори Г., Фричмана Б. Для решения задачи демодуляции в канале с памятью Омур Д.Д. предложил использовать разработанный Витерби А. алгоритм декодирования сверточных кодов (так называемый «алгоритм Витерби» – АВ). Кловским Д.Д. было предложено использовать «испытательный импульс» в структуре группового сигнала для оценивания параметров канала в месте приема, а также использовать обратную связь по решению (ОСР) в оптимальном поэлементном приемнике для компенсации сигналов межсимвольной интерференции, возникающей при высокоскоростной передаче информации. Применение обратной связи по решению рассматривалось в работах Макарова С.Б., Остина М., Хворостенко Н.П., Цикина И.А. и др.

В итоге, под руководством Кловского Д.Д. был разработан алгоритм «приема «в целом» с поэлементным принятием решения» (ПЦППР), который обладает в канале с памятью помехоустойчивостью, близкой к потенциально достижимой, и который подразумевает изучение свойств канала – оценивание импульсной характеристики.

В работах Э. Сейджа, Дж. Мелсы рассмотрены основные аспекты теории оценивания состояния и параметров систем связи. Здесь же и рассмотрен метод наименьших квадратов для оценивания параметров канала связи, который используется в диссертации.

Оценивание характеристик канала связи с памятью при последовательной передаче дискретных сообщений методом регуляризации и методом максимального правдоподобия подробно представлено в работах Карташевского В.Г.

Проблемы разработки алгоритмов приема сигналов в каналах с памятью при «последовательном» методе передачи дискретных сообщений рассмотрены также в работах отечественных и зарубежных авторов Зюко А.Г., Карташевского В.Г., Макарова С.Б., Мишина Д.В., Николаева Б.И., Хабарова Е.О., Цикина И.А., Витерби А.Д., Кеннеди Р., Унгербоека Г. и др.

Возможность использования параллельной передачи данных и частотного разделения с мультиплексированием была предложена в 1960 годах. Подробное описание принципов технологии OFDM дано, в частности, в книге «OFDM for wireless multimedia communications», выпущенной в 2000 году, зарубежными авторами Richard van Nee и Ramjee Prasad.

Стремление разработчиков технологии OFDM обеспечить её нечувствительность к увеличению задержки из-за многолучевого распространения сигнала привело к внедрению в структуру группового сигнала защитных интервалов.

В работах многих отечественных и зарубежных авторов подробно рассмотрено формирование OFDM-радиосигнала, добавление защитных интервалов, требования к системе OFDM, а также схемы приема и передачи сигналов OFDM.

Алгоритмы обработки сигналов OFDM в системах связи в каналах с памятью рассмотрены в публикациях Крейнделина В.Б., Бакулина М.Г., Шломы А.М., Шумова А.П., Карташевского В.Г., Козлова С.В., Кузнецова И.В., Tevfic Yusek и многих других авторов.

Методы оптимального приёма, развитые для приёма дискретных сообщений в каналах с памятью для последовательных систем, оказалось возможным весьма эффективно использовать и для «параллельных» систем, к которым, как известно, принадлежит система OFDM. Такая возможность стала очевидной с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ), при котором «параллельная» система на передаче трансформируется в «последовательную» систему передачи отсчетов огибающей OFDM-символа по каналу связи. Как показано в работах Карташевского В.Г., алгоритм ПЦППР может быть весьма успешно использован при приёме сигналов OFDM в каналах с памятью. Более того, при использовании алгоритма ПЦППР отпадает необходимость в формировании на передаче защитных промежутков в структуре сигнала OFDM. Отказ от использования защитных промежутков даёт эффект повышения спектральной эффективности системы OFDM примерно на 20%.

Целью работы является исследование и разработка алгоритмов оценивания импульсной характеристики для субоптимальных алгоритмов приёма «в целом» при использовании технологии OFDM в каналах с памятью.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ модели канала связи с памятью;
- анализ формирования OFDM-сигнала на передаче и классической схемы приема сигналов OFDM в каналах с памятью;
- разработка алгоритмов оценивания импульсной характеристики (ИХ) для системы OFDM в каналах с памятью;
- оценка качества алгоритмов оценивания ИХ системы OFDM в каналах с памятью;
- анализ помехоустойчивости алгоритма «прием в целом с поэлементным принятием решений» для обработки сигналов OFDM с оцененной ИХ в канале с памятью.

Объектом исследования является технология OFDM в каналах с памятью.

Предметом исследования являются алгоритмы оценивания импульсной характеристики технологии OFDM в каналах с памятью.

Методы исследования. Основные теоретические исследования выполнены на основе методов теории вероятности, математической статистики, теории оптимального приёма дискретных сообщений и методов оценивания. Экспе-

риментальные исследования диссертации реализованы с применением метода статистических испытаний, имитационного моделирования и вычислительных методов, реализованных в Matlab.

Достоверность изложенных положений работы обосновывается корректным выбором исходных данных, строгим использованием математического аппарата, а также результатами имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование традиционной схемы формирования OFDM-сигнала снижает пропускную способность системы связи за счет защитных интервалов, включенных в структуру передаваемого сигнала.

2. Для обработки сигналов OFDM в каналах с памятью целесообразно использовать алгоритм «приём в целом с поэлементным принятием решений» (ПЦППР) с высокой помехоустойчивостью и минимальной задержкой в принятии решений о передаваемых символах. Данный алгоритм требует знания импульсной характеристики канала в месте приема.

3. При малых отношениях сигнал/шум применение метода регуляризации для оценивания импульсной характеристики улучшает качество оценок ИХ в системе OFDM в каналах с памятью. В частности, для памяти канала $M = 4$ и отношении $\frac{P_c}{P_u} = 1$, при оценивании методом регуляризации значение нормированного СКО составляет $\varepsilon = 5,1$, а при оценивании методом наименьших квадратов составляет $\varepsilon = 10,1$.

4. Разработанный алгоритм оценивания ИХ используется в алгоритме ПЦППР для обработки сигналов OFDM, и реализует более высокую помехоустойчивость по сравнению с классическим алгоритмом обработки сигналов OFDM при наличии памяти в канале. В частности, при вероятности ошибки 10^{-1} алгоритм ПЦППР дает энергетический выигрыш 3 дБ по сравнению с классическим алгоритмом обработки сигналов OFDM при памяти канала $M = 3$.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует пп. 8, 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций («Исследование и разработка новых сигналов, модемов, кодеков, мультиплексоров и селекторов, обеспечивающих высокую надежность обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех» и «Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций»).

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- разработана *новая* структура канального сигнала OFDM с исключением защитных интервалов;
- разработаны алгоритмы оценивания ИХ системы OFDM, основанные на использовании метода регуляризации и метода наименьших квадратов, отличающиеся тем, что разработанные алгоритмы ориентированы на использование в каналах с памятью; статистическим моделированием получены характеристики точности оценивания ИХ;

– для использования в каналах с памятью *разработан* алгоритм получения оценок ИХ весовым суммированием первоначальных оценок ИХ, полученным по тестовым комбинациям, и текущих оценок ИХ, полученных по рабочему пакету;

– предложена *новая* структура испытательной комбинации для повышения помехоустойчивости приёма сигналов OFDM в каналах с памятью.

Теоретическая значимость и прикладная ценность Теоретическая значимость заключается в разработке алгоритмов оценивания ИХ для когерентного приема сигналов OFDM в каналах с памятью. Прикладная ценность заключается в повышении помехоустойчивости обработки сигналов OFDM на приеме и увеличении спектральной эффективности системы OFDM в каналах с памятью.

Реализация и внедрение работы. Результаты диссертационной работы были внедрены в рамках реализации процессов управления и технической эксплуатации Поволжского филиала ПАО «Мегафон». Результаты использованы при оценке технических возможностей и рабочих характеристик телекоммуникационной инфраструктуры при реализации взаимодействия широкополосных сотовых сетей и беспроводных высокоскоростных локальных сетей с помощью многорежимного абонентского устройства. Также результаты используются в учебном процессе на кафедре «Радиоэлектронных систем» ПГУТИ в курсе «Цифровой обработки сигналов» при проведении лекционных и практических занятий.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов работы подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами имитационного моделирования и списком публикаций и выступлений, на российских и международных конференциях. В 2014 году автор выиграла в Самарском областном конкурсе «Молодой ученый» в номинации «Аспирант» с материалами, представленными в диссертационной работе. Основные полученные результаты диссертационной работы сообщались на следующих конференциях:

– Processing of the 2020 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (EIconRus, г. Москва, 2020 г.). – **с индексацией в Scopus.**

– 15-ая, 16-ая, 20-ая Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA, г. Москва, 2013-2018 г.).

– 15-ая, 16-ая, 17-ая, 19-ая, 20-ая, 22-ая Международная конференция «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (ПТ и ТТ, г. Казань, Уфа, Самара, 2014-2019 г.).

– 20-ая, 21-ая, 22-ая, 25-ая, 26-ая Российская научная конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (г. Самара, 2013-2019 г.).

– 69-ая Международная конференция «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS, г. Москва, 2014 г.).

– 20-ая, 24-ая Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь» (RLNC, г. Воронеж, 2014-2018 г.).

- 5-ая Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации» (ITRT, г. Тольятти, 2015 г.).
- 9-ая Международная научно-техническая конференция «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях» (г. Алмата, 2014 г.).
- 4-ая Всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ, г. Смоленск, 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 35 научных работ, в том числе 1 патент на изобретение; 1 статья с индексацией в Scopus; 4 статьи из перечня, рекомендованного ВАК РФ для публикации результатов диссертационных исследований; 2 статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ; 27 тезисов докладов международных и российских научных конференций.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертация содержит введение, четыре главы и заключение, изложенные на 146 страницах. В работу включено 49 рисунков, список литературы из 135 наименований, три приложения с представленными актами внедрения и документом, подтверждающим наличие патента на изобретение.

Сведения о личном вкладе автора: Основные научные результаты теоретических и экспериментальных исследований, выводы, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит часть, связанная с постановкой задач, разработкой алгоритмов, компьютерное моделирование алгоритмов оценивания ИХ системы OFDM и алгоритмов обработки сигналов OFDM в канале с памятью.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе даны теоретические сведения о модели канала и помех в нем, о формировании OFDM сигнала и применении технологии OFDM в современных системах связи.

Показана структурная схема системы связи, рассмотрены типы модуляции и помех в каналах связи. Описана модель флуктуационной помехи $n(t)$, которая считается аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

Основной системной характеристикой для описания канала связи с памятью является импульсная характеристика (ИХ) – $h(t, \tau)$, представляющую собой реакцию канала в момент времени t на дельта-импульс, поданный в момент времени $t - \tau$. Канал связи с памятью M характеризуется длительностью импульсной реакции, выраженной числом тактовых интервалов.

OFDM представляет собой технологию одновременной передачи потока цифровых данных по многим частотным каналам. Алгоритм формирования сигнала OFDM технически достаточно прост и эффективно используется для модуляции нескольких поднесущих на основе преобразований цифровой обработки сигналов. Также для устранения межсимвольной интерференции между соседними символами вводятся защитные временные интервалы (постфикс, префикс).

В первой главе приведены структурная схема и традиционный алгоритм формирования сигнала OFDM на основе цифровой обработки сигналов, где отсчеты огибающей OFDM символа вычисляются обратным дискретным преобразованием Фурье с помощью алгоритмов БПФ.

Рассмотрено формирование OFDM-сигнала с использованием модуляции QAM-16. На входе QAM-16-модулятора наблюдается последовательность кодовых символов b_i . Каждые четыре кодовых символа преобразуются в \dot{d}_i – комплексное число, характеризующее одну из 16 сигнальных точек, где $|\dot{d}_i|$ – амплитуда и $\arg(\dot{d}_i)$ – фаза i -го поднесущего колебания. Таким образом, если число ортогональных поднесущих равно N , то значения отсчетов комплексной огибающей OFDM-символа длительности T запишутся в виде:

$$\dot{u}_k(t_l) = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{d}_i \exp\left\{j \frac{2\pi l}{T} (t - t_k)\right\}, \quad (1)$$

где $l, i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, $t_l = t_k + l\Delta t$, $\Delta t = \frac{T}{N-1}$, N – число ортогональных поднесущих.

Главным недостатком традиционной схемы с формированием защитного интервала между символами OFDM является снижение спектральной эффективности системы OFDM, примерно на 20%.

В качестве областей применения технологии OFDM можно выделить беспроводную и проводную связь. OFDM используется в 5G, LTE, LTE-A, в стандартах цифрового наземного и спутникового телерадиовещания и т.д.

Во второй главе была рассмотрена задача обработки сигналов OFDM в каналах связи с памятью, которая состоит в вынесении решений о передаваемых кодовых символах b_i .

Классическим методом обработки сигналов OFDM является когерентная демодуляция, согласно которой принятые отсчеты огибающей OFDM-символа поступают на блок БПФ без каких-либо дополнительных обработок.

При наличии памяти в канале связи помехоустойчивость классической схемы когерентного приема OFDM системы, основанной на ДПФ, значительно снижается (см. рисунок 1). Так, например, при памяти канала $M = 3$ и частоте ошибок на символ 10^{-3} энергетический проигрыш составляет 6 дБ.

Предлагается дополнительная обработка в месте приема перед блоком БПФ в системе OFDM, основанная на алгоритме «прием «в целом»» с поэлементным принятием решения» (ПЦППР). Использование алгоритма ПЦППР позволяет получить близкие к оптимальным (по критерию максимального правдоподобия) оценки отсчетов огибающей OFDM-символа, используемые далее в блоке вычисления ДПФ.

При применении алгоритма ПЦППР в каналах с памятью требуется знание оценок ИХ. Структурная схема приема OFDM-сигнала с алгоритмом ПЦППР в каналах с памятью показана на рисунке 2.

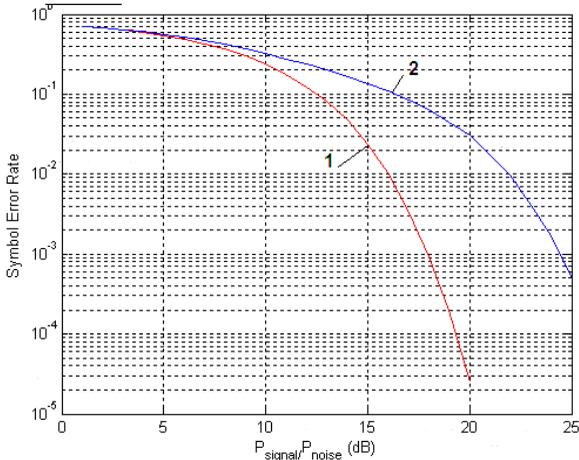


Рисунок 1 – Помехоустойчивость классической схемы приема OFDM (кривая 1 - канал без памяти, кривая 2 – канал с памятью.)

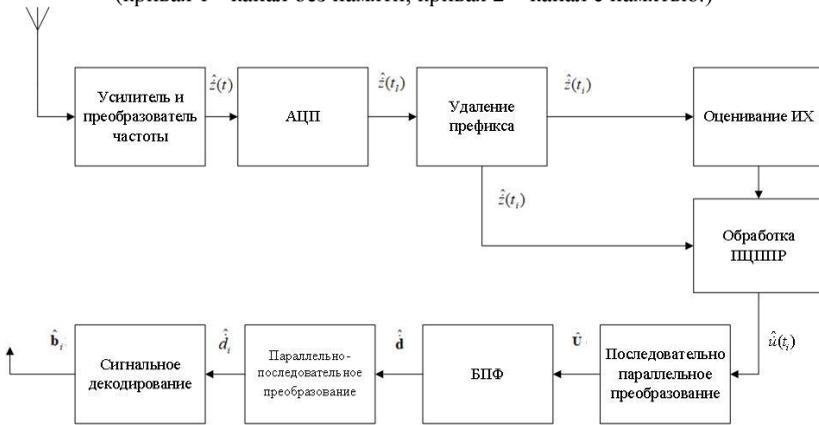


Рисунок 2 – Структурная схема приема OFDM сигнала с алгоритмом ПЦППР в каналах с памятью

Рассмотрим алгоритм приема сигналов OFDM с обработкой ПЦППР. Если импульсная характеристика канала (матрица \mathbf{H}) с постоянными параметрами определяется отсчетами h_0, h_1, \dots, h_{M-1} , то матричная запись принимаемого сигнала показана в виде:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{U} + \mathbf{W}, \quad (2)$$

где $\mathbf{Z} = [\hat{z}_0 \ \hat{z}_1 \ \dots \ \hat{z}_{N-1}]^T$ – вектор отсчетов принимаемого сигнала, $\mathbf{U} = [\hat{u}_0 \ \hat{u}_1 \ \dots \ \hat{u}_{N-1}]^T$ – вектор отсчетов огибающей OFDM-символов,

$\mathbf{W} = [\dot{w}_0 \quad \dot{w}_1 \quad \dots \quad \dot{w}_N]^T$ – вектор отсчетов шума, $[\cdot]^T$ – символ транспонирования.

На интервале анализа $T_a = (N + M - 1)\Delta t$ следует искать совместно оценки максимального правдоподобия передаваемых отсчетов \dot{u}_i огибающей OFDM-символа.

Для канала с постоянными параметрами и аддитивным белым гауссовским шумом $w(t)$ совместно оптимальные согласно (2) оценки составляющих вектора \mathbf{U} могут быть найдены по правилу

$$\hat{\mathbf{U}} = \arg \min_j \left\{ \int_0^{T_a} \left[z(t) - \sum_{k=0}^{N-1} \dot{u}_{kj} h(t - k \cdot \Delta t) \right]^2 dt \right\}, \quad (3)$$

где $j, k = 0, 1, \dots, N-1$, \dot{u}_{kj} – отсчеты огибающей OFDM-символа опорного сигнала

Применение схемы оптимального приема в канале с памятью, использующей процедуру «приема в целом», вряд ли возможно, так как, например, при использовании QAM-16 (количество поднесущих $N=16$) для нахождения решений о QAM-символах \hat{d}_i необходим перебор всех возможных вариантов реализации 16-ричных символов на 16 позициях вектора \mathbf{U} .

Следовательно, минимизация в (3) невозможна с использованием переборных алгоритмов. Очевидно, что нахождение из выражения (3) оценок максимального правдоподобия составляющих вектора \mathbf{U} эквивалентно решению обратной задачи по оценке вектора \mathbf{U} из матричного уравнения (2).

Матричная запись оценок отсчетов OFDM-символов вектора \mathbf{U} , полученных методом регуляризации, имеет вид:

$$\hat{\mathbf{U}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Z}, \quad (4)$$

α – параметр регуляризации, \mathbf{I} – единичная матрица.

Для каналов с памятью предлагается новая структура потока OFDM-символов с исключением защитных интервалов, но с добавлением испытательной комбинации (ИК) в каждый OFDM-символ, информационное содержание которой априори известно в месте приема.

При традиционном формировании потока OFDM-символов вместо ИК в структуру потока добавляется специальный пилот-символ, предназначенный для формирования оценок параметров используемого канала. И при традиционной и при новой структуре потока OFDM-символов информационное содержание ИК необходимо выбирать таким образом, чтобы оценки параметров канала в месте приёма (ИХ) формировались простыми алгоритмами с высокими точностными характеристиками.

На рисунке 3 представлена структурная схема формирования потока OFDM-символов, где обозначено ПС – полезный сигнал.



Рисунок 3 – Структурная схема формирования потока OFDM-символов

В третьей главе была рассмотрена задача оценивания ИХ для оптимальных алгоритмов приёма сигналов OFDM в каналах с памятью.

Для каналов с памятью рассмотрены алгоритмы оценивания ИХ для последовательных систем приёма дискретных сообщений, принимающих значения действительных чисел ± 1 , и для параллельных систем (OFDM), содержащих в структуре сигнала комплексные числа.

В реальных каналах связи решаются две задачи: задача первоначального оценивания ИХ и задача текущего оценивания ИХ. Первоначальное оценивание ИХ осуществляется по идеально классифицированной выборке наблюдаемого сигнала. При решении задачи текущего оценивания ИХ, которая позволяет следить за изменяющимися параметрами канала, оценка осуществляется по условно классифицированной выборке, полученной по предварительным решениям о переданных символах с помощью обратной связи по решению.

Для оценивания ИХ рассмотрен метод максимального правдоподобия, который сводится к решению уравнения (2) $\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{U} + \mathbf{W}$ наблюдаемого сигнала на входе приемного устройства по критерию максимального правдоподобия.

Такое решение матричного уравнения $\mathbf{H}_{ML} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{Z}$ не обладает устойчивостью, однако преодолеть эту сложность при оценке ИХ можно с использованием метода регуляризации.

При первоначальном оценивании нахождение оценок ИХ методом регуляризации осуществляется по формуле:

$$\mathbf{H}_\alpha = (\mathbf{U}^T\mathbf{U} + \alpha\mathbf{I})^{-1}\mathbf{U}^T\mathbf{Z},$$

где α - параметр регуляризации.

Главным недостатком метода регуляризации для оценки ИХ является наличие смещения полученных оценок. Рассмотрено несколько методов компенсации смещения, отличающихся сложностью реализации и точностью оценивания параметров.

В главе показано, что при первоначальном оценивании также можно использовать второй метод оценивания ИХ – метод наименьших квадратов по формуле:

$$\hat{\mathbf{H}}_{LS}^k = ((\mathbf{U}^k)^T(\mathbf{R}^k)^{-1}\mathbf{U}^k)^{-1}(\mathbf{U}^k)^T(\mathbf{R}^k)^{-1}\mathbf{Z}^k.$$

При текущем оценивании может быть найден любой отсчет ИХ на $k + 1$ шаге, если в качестве оставшихся неизвестных отсчетов взять оценки ИХ, полученные на предыдущем k -ом шаге после первоначального оценивания любым методом.

Рассмотрены примеры оценивания ИХ при памяти канала $M = 2$, $M = 3$ методами максимального правдоподобия и регуляризации. Получены зависимости нормированного значения СКО оценок ИХ при фиксированных значениях сигнал/шум и различных значениях параметра регуляризации α . Оценивание методом регуляризации обладает меньшими значениями нормированного СКО, чем методом максимального правдоподобия при правильном выборе параметра регуляризации. Рассмотренные методы оценивания ИХ канала для последовательных систем передачи дискретных сообщений целесообразно использовать и для параллельных систем, к которым относится система OFDM.

Разработан алгоритм получения оценок ИХ для новой структуры OFDM потока (см. рисунок 4) весовым суммированием первоначальных оценок ИХ, полученных по испытательным комбинациям (ИК), и текущих оценок ИХ, полученных по полезному сигналу (ПС).

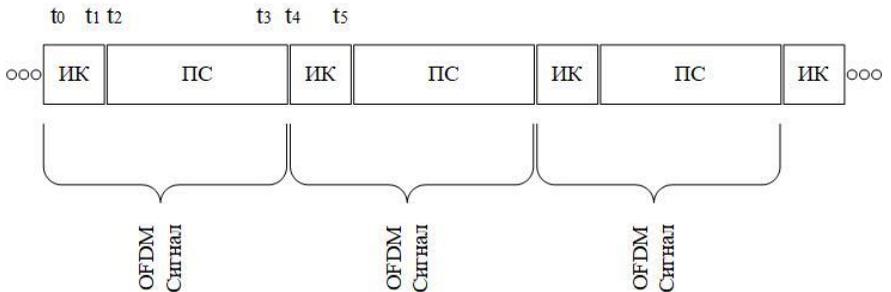


Рисунок 4 – Новая структура потока OFDM

На интервале времени $t_0 - t_1$ осуществляется предварительное оценивание ИХ методом регуляризации $\mathbf{H}_\alpha = \{\hat{h}_{\alpha 0}; \hat{h}_{\alpha 1}; \dots; \hat{h}_{\alpha(M-1)}\}$ на основе ИК, информационное содержание которой известно в месте приема.

Далее на интервале времени $t_1 - t_2$ с использованием полученных на предыдущем шаге оценок отсчетов ИХ \mathbf{H}_α осуществляется обработка сигнала OFDM, то есть алгоритмом ПЦППР получены оценки отсчетов огибающей OFDM $\mathbf{U} = \{\hat{u}_1; \hat{u}_2; \dots; \hat{u}_{(N-1)}\}$.

На интервале времени $t_2 - t_3$ с помощью оцененных значений отсчетов огибающей OFDM сигнала \mathbf{U} получены оценки ИХ $\check{\mathbf{H}}_\alpha = \{\check{h}_{\alpha 0}; \check{h}_{\alpha 1}; \dots; \check{h}_{\alpha(M-1)}\}$ методом регуляризации.

Далее, воспользовавшись алгоритмом весового суммирования по формуле для текущего оценивания ИХ, получаем:

$$\hat{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{H}}_\alpha + (1 - \Delta)\check{\mathbf{H}}_\alpha.$$

На следующих интервалах времени новой структуры потока OFDM представленный алгоритм обработки сигналов OFDM повторяется.

Таким образом, получены уточненные оценки ИХ, которые позволяют более точно обработать OFDM-сигнал на приеме и уменьшить вероятность битовой ошибки приёма при наличии памяти в канале.

В четвёртой главе представлены результаты имитационного моделирования при использовании математического пакета Matlab. Моделировались следующие алгоритмы для системы OFDM в канале с памятью:

- оценивание ИХ несколькими методами;
- подбор наилучшей ИК OFDM-символов для оценивания ИХ методом регуляризации;
- обработка сигналов OFDM алгоритмом ПЦППР с использованием регуляризованных оценок ИХ.

На рисунке 5 представлена структурная схема моделирования алгоритмов оценивания ИХ системы OFDM в каналах с памятью. Моделирование проводилось для канала с аддитивным белым гауссовским шумом и различными значениями памяти M канала связи.

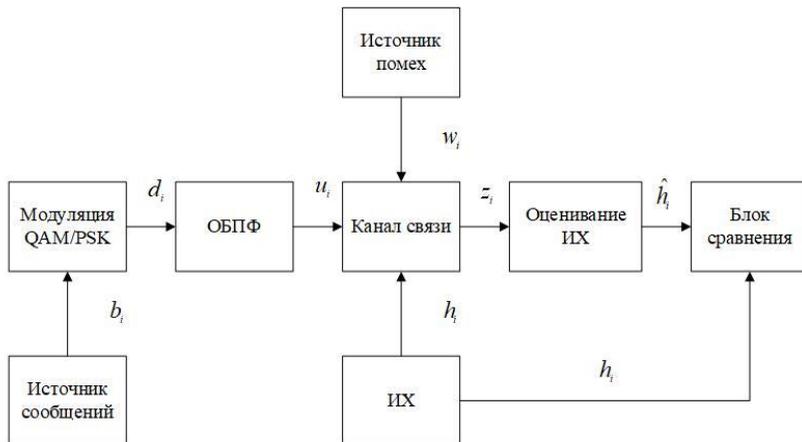


Рисунок 5 – Структурная схема моделирования алгоритмов оценивания ИХ системы OFDM в каналах с памятью

В месте приема сигнал OFDM, как полосовой сигнал, обрабатывается на основе выделения квадратурных компонент наблюдаемого колебания. Это, соответственно, потребует формирования оценок квадратурных компонент импульсной характеристики канала.

После канала связи принятая реализация сигнала из смеси полезного и мешающего сигналов соответствует уравнению

$$\mathbf{Z} = \mathbf{U}\mathbf{H} + \mathbf{W},$$

$$\text{где } \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{0\cos} - jz_{0\sin} \\ z_{1\cos} - jz_{1\sin} \\ \dots \\ z_{N\cos} - jz_{N\sin} \end{bmatrix} \text{ – вектор комплексных отсчетов принятого сигнала,}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{0\cos} - jh_{0\sin} \\ h_{1\cos} - jh_{1\sin} \\ \dots \\ h_{N\cos} - jh_{N\sin} \end{bmatrix} \text{ – вектор комплексных отсчетов импульсной характери-}$$

стики, $\mathbf{W} = [w_0, w_1, \dots, w_{N+M-1}]^T$ – вектор отсчетов комплексного шума, а также $z_i = z_{i\text{Re}} + jz_{i\text{Im}}$, $z_{i\cos} = z_{i\text{Re}}$, $z_{i\sin} = -z_{i\text{Im}}$, $h_i = h_{i\text{Re}} + jh_{i\text{Im}}$, $h_{i\cos} = h_{i\text{Re}}$, $h_{i\sin} = -h_{i\text{Im}}$, $i = 0..N-1$.

При моделировании оценки ИХ системы OFDM методом наименьших квадратов и методом регуляризации рассчитывались отдельно для квадратурных компонент:

$$\hat{\mathbf{H}}_{\alpha\cos} = [\mathbf{U}_{\cos}^T \mathbf{U}_{\cos} + \alpha \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{U}_{\cos}^T \mathbf{Z}_{\cos},$$

$$\hat{\mathbf{H}}_{LS\cos} = ((\mathbf{U}_{\cos})^H (\mathbf{R}_{\cos})^{-1} \mathbf{U}_{\cos})^{-1} (\mathbf{U}_{\cos})^H (\mathbf{R})^{-1} \mathbf{Z}_{\cos},$$

$$\text{где } \hat{\mathbf{U}}_{\cos} = \begin{bmatrix} \hat{u}_{1\cos} \\ \hat{u}_{2\cos} \\ \dots \\ \hat{u}_{(N-1)\cos} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{H}}_{\cos} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{0\cos} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{h}_{0\cos} & \hat{h}_{0\cos} & \dots & 0 \\ \dots & \hat{h}_{1\cos} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \hat{h}_{0\cos} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{Z}}_{\cos} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{1\cos} \\ \hat{z}_{2\cos} \\ \dots \\ \hat{z}_{(N-1)\cos} \end{bmatrix}.$$

$$\hat{\mathbf{H}}_{\alpha\sin} = [\mathbf{U}_{\sin}^T \mathbf{U}_{\sin} + \alpha \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{U}_{\sin}^T \mathbf{Z}_{\sin},$$

$$\hat{\mathbf{H}}_{LS\sin} = ((\mathbf{U}_{\sin})^H (\mathbf{R}_{\sin})^{-1} \mathbf{U}_{\sin})^{-1} (\mathbf{U}_{\sin})^H (\mathbf{R})^{-1} \mathbf{Z}_{\sin},$$

$$\text{где } \hat{\mathbf{U}}_{\sin} = \begin{bmatrix} \hat{u}_{1\sin} \\ \hat{u}_{2\sin} \\ \dots \\ \hat{u}_{(N-1)\sin} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{H}}_{\sin} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{0\sin} & 0 & 0 & 0 \\ \hat{h}_{0\sin} & \hat{h}_{0\sin} & \dots & 0 \\ \dots & \hat{h}_{1\sin} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \hat{h}_{0\sin} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{Z}}_{\sin} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{1\sin} \\ \hat{z}_{2\sin} \\ \dots \\ \hat{z}_{(N-1)\sin} \end{bmatrix}.$$

Согласно рисунку 6, где представлена зависимость нормированной СКО оценивания ИХ, при больших значениях шума (малое значение отношения сигнал/шум) оценивание ИХ методом регуляризации обладает существенно меньшими ошибками оценивания по сравнению с методом наименьших квад-

ратов, например, при малом отношении сигнал/шум нормированное СКО уменьшается в 5 раз.

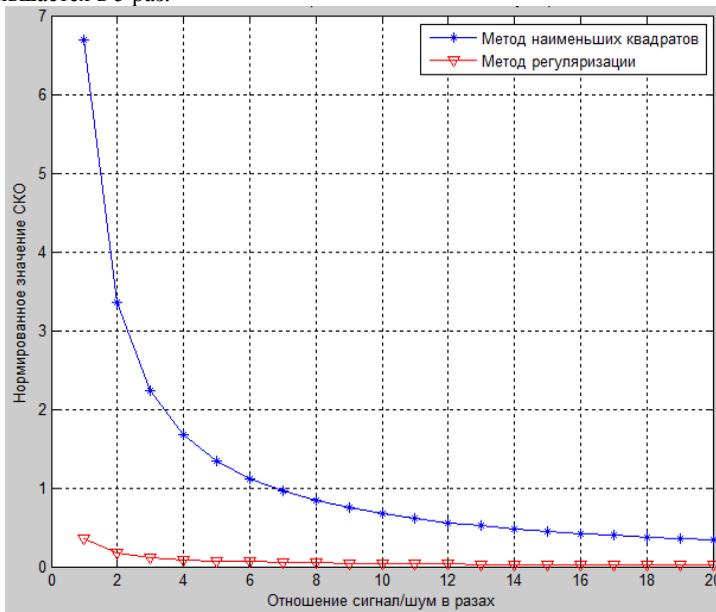


Рисунок 6 – Зависимость нормированного СКО оценок ИХ от отношения сигнал/шум при памяти канала $M = 2$

На рисунке 7 представлена зависимость нормированной средней квадратической ошибки при формировании оценок ИХ методом регуляризации при различных значениях параметра регуляризации при памяти канала $M = 2$ и значениях ИХ $h_0 = 2, h_1 = -1,5$ для системы OFDM .

При отношении $\frac{P_c}{P_u} = 1$ дБ, возможным значением параметра регуляризации является $\alpha = 0,75$, при котором нормированное СКО минимально; при отношении $\frac{P_c}{P_u} = 5$ дБ допустимыми значениями параметра регуляризации являются значения $\alpha = 0,25 - 0,5$. При отношении $\frac{P_c}{P_u} = 10$ дБ наилучшим значением является – $\alpha = 0,125$. При выборе параметра регуляризации следует ориентироваться на минимальное значение нормированной СКО, если не использовать алгоритмы компенсации смещения у регуляризованных оценок ИХ.

Далее при моделировании проводился подбор QAM-символов ИК системы OFDM-QAM-16 для алгоритма оценивания ИХ методом регуляризации в каналах с памятью.

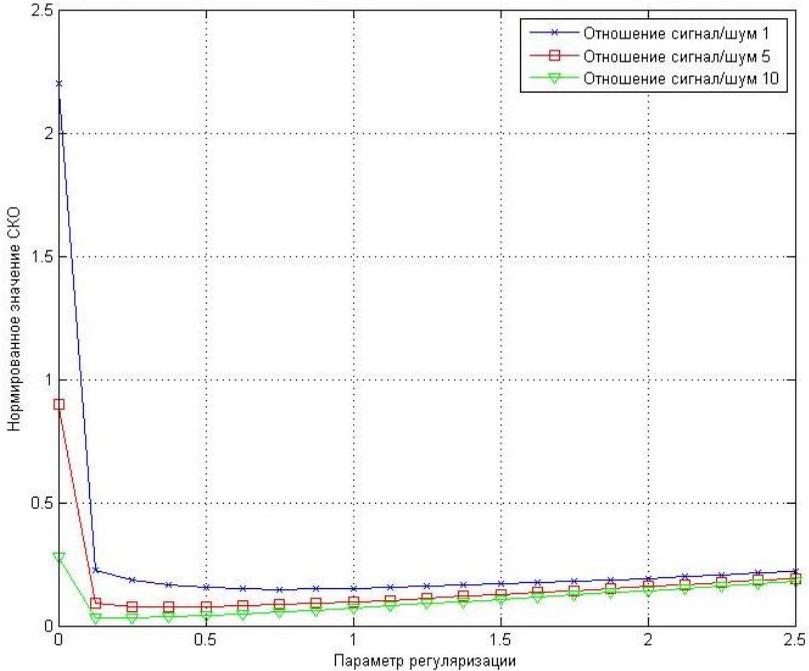


Рисунок 7 – Зависимость нормированной СКО ИХ от параметра регуляризации при памяти $M = 2$

Матрицы отсчётов OFDM-символов формируются из 16 значений QAM-символов. Формируются отсчёты OFDM-символов для заданной ИК, т. е. формируются матрицы \mathbf{U}_8 , \mathbf{U}_9 , \mathbf{U}_{12} , \mathbf{U}_{13} размером 16×16 по QAM-символам I квадранта сигнального созвездия (см. рисунок 8):

$$\mathbf{U}_8 = \begin{bmatrix} 1+3j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1+3j \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_9 = \begin{bmatrix} 1+1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1+1j \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U}_{12} = \begin{bmatrix} 3+3j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3+3j \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_{13} = \begin{bmatrix} 3+1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3+1j \end{bmatrix}.$$

Выявлены «наилучшие» QAM-символы ИК (см. рисунок 9), при которых нормированное СКО регуляризованных оценок ИХ минимально в каналах с памятью для рассматриваемого созвездия QAM-16.

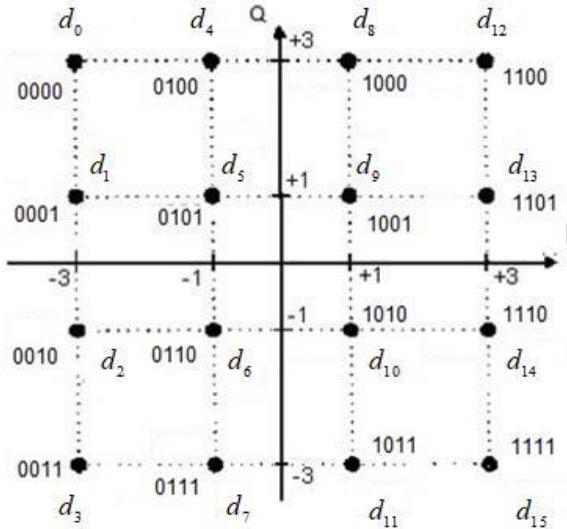


Рисунок 8 – Сигнальное созвездие модуляции QAM-16

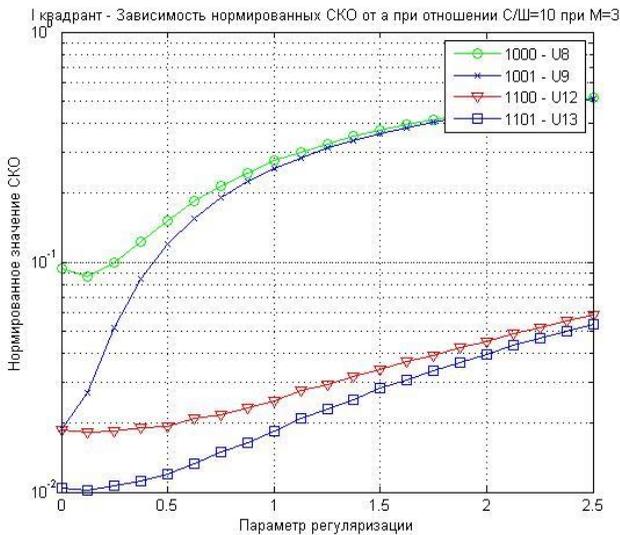


Рисунок 9 – Зависимость нормированной СКО от α при оценивании ИХ методом регуляризации при наилучших QAM-символах ИК

Из рисунка 9 следует, что минимальным значением СКО обладает ИК, для которой матрица отсчетов огибающей OFDM символов имеет вид

$$\mathbf{U}_{13} = \begin{bmatrix} 3+1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3+1j \end{bmatrix}, \text{ полученная 16-ю «четверками» кодовых символов}$$

1101, которым соответствуют значения QAM-символов $d_{13} = 3+1j$.

Далее проведено моделирование для других квадрантов II, III, IV сигнального созвездия модуляции QAM-16, с помощью которого сформированы OFDM-символы ИК.

Таким образом, по результатам моделирования оптимальными значениями ИК, при которых нормированное СКО оценивания ИХ минимально, являются по 16 одинаковых значений «четверок» кодовых символов «0001», «0010», «1101» или «1110», которым соответствуют отсчеты огибающей OFDM-символов в виде:

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} -3+1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -3+1j \end{bmatrix}, \mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} -3-1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -3-1j \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{U}_{13} = \begin{bmatrix} 3+1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3+1j \end{bmatrix}, \mathbf{U}_{14} = \begin{bmatrix} 3-1j & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 3-1j \end{bmatrix}.$$

В диссертации представлены зависимости нормированных СКО, полученных оцениванием ИХ методом регуляризации при указанных значениях матриц отсчетов огибающей OFDM-символов.

Полученные зависимости нормированной СКО регуляризованных оценок ИХ для выбранных значений ИК OFDM-символов (соответствующие матрицам \mathbf{U}_1 , \mathbf{U}_2 , \mathbf{U}_{13} , \mathbf{U}_{14}) совпали для наилучших значений параметра регуляризации в канале с памятью при $M=3$. При увеличении значения параметра регуляризации увеличивается нормированное значение СКО за счет увеличения смещения регуляризованных оценок.

В заключительной части эксперимента проведено моделирование алгоритма обработки сигналов OFDM алгоритмом ПЦППР, согласно схеме рисунка 10.

На рисунке 11 приведены графики побитовой вероятности ошибок в канале с памятью. Полученные кривые показывают, что помехоустойчивость алгоритма ПЦППР при использовании регуляризованных оценок ИХ (по выбранным значениям символов ИК) лишь незначительно уступает потенциальной помехоустойчивости алгоритма ПЦППР с точной известной импульсной характеристикой в месте приема. Энергетический проигрыш составляет всего

2дБ в широком диапазоне изменения отношения сигнал/шум $\frac{P_c}{P_{ш}}$.

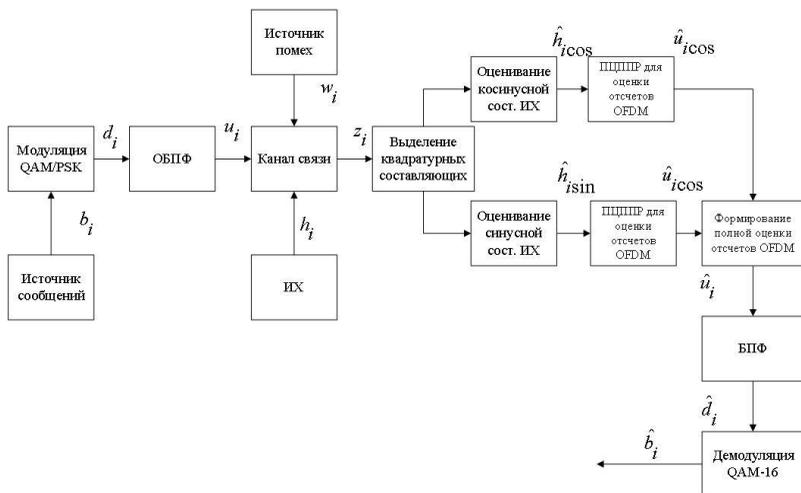


Рисунок 10 – Структурная схема обработки OFDM на основе выделения квадратурных компонент наблюдаемого колебания

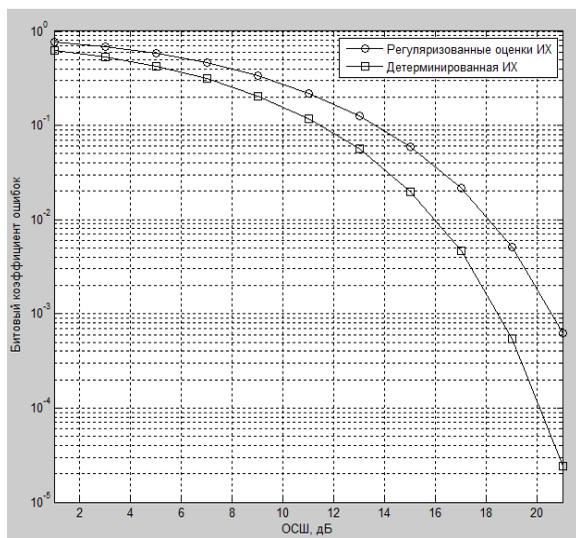


Рисунок 11 – Побитовая вероятность ошибок в канале с памятью при наилучшей ИХ

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационного исследования, состоящие в следующем:

1. В каналах с памятью использование традиционных методов обработки сигналов OFDM, не учитывающих рассеяние передаваемого сигнала во времени, не позволяет повысить помехоустойчивость приёма без привлечения оптимальных (или субоптимальных) алгоритмов обработки сигналов.

Показана целесообразность разработки алгоритмов оптимального оценивания параметров канала связи с памятью и их использование в алгоритмах, реализующих «приём в целом» при обработке сигналов OFDM. Предлагается дополнительная обработка в месте приема, основанная на алгоритме оценивания ИХ и алгоритме ПЦППР.

2. Для увеличения спектральной эффективности в каналах с памятью предлагается новая структура потока OFDM символов с исключением защитных интервалов, и добавлением в каждый символ ИК, информационное содержание которой априори известно в месте приема. Для системы OFDM в каналах с памятью разработаны алгоритмы оценивания ИХ методом регуляризации и методом наименьших квадратов. Получены зависимости нормированного значения СКО при оценивании ИХ для различных значений отношения сигнал/шум и фиксированного параметра регуляризации α . В области малых отношений сигнал/шум регуляризованные оценки обладают существенно меньшей ошибкой оценивания импульсной характеристики, чем оценки, полученные методом наименьших квадратов. При малой памяти канала $M=2$ выигрыш по СКО достигает 5 раз.

3. При выборе параметра регуляризации следует ориентироваться на минимальное значение нормированной СКО, если не использовать алгоритмы компенсации смещения у регуляризованных оценок ИХ.

4. Подобранные значения испытательной комбинации OFDM-символов позволяют улучшить показатели качества оценивания ИХ в каналах с памятью. При использовании наилучших значений ИК OFDM-символов при малых значениях шума отсутствует необходимость в использовании метода регуляризации для оценивания параметров ИХ, т.е. при $\alpha = 0$ метод регуляризации для оценивания ИХ эквивалентен методу максимального правдоподобия (МП) для системы OFDM в каналах с памятью. Это объясняется тем, что специальный подбор элементов ИК с дальнейшим формированием посредством ДПФ матрицы отсчетов огибающей OFDM-символа приводит к тому, что элементы главной диагонали данной матрицы даже в присутствии шума не вырождаются в ноль, что в конечном счете гарантирует в месте приёма надежное обращение данной матрицы. При больших значениях шума рекомендуется использование метода регуляризации с подбором параметра регуляризации α , который даст улучшение показателей качества оценивания ИХ системы OFDM в каналах с памятью.

5. Потенциальные возможности алгоритма ПЦППР в сочетании с оцененными значениями ИХ алгоритмом регуляризации на основе выделения квадратурных компонент реализует хорошие показатели помехоустойчивости приёма OFDM-символов. Энергетический проигрыш ситуации, в которой параметры ИХ в месте приёма известны точно, составляет 2 дБ в широком диапазоне изменения отношения сигнал/шум.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. С целью развития темы диссертационного исследования в дальнейшем на её основе планируется создание программного обеспечения для процессора демодулятора системы OFDM в каналах с памятью. Также планируется исследование алгоритмов оценивания ИХ, имеющей случайные временные флуктуации и доплеровское расширение спектра при движении абонентов в условиях городской застройки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. Слипенчук, К.С. Методы оценивания импульсной характеристики системы OFDM в канале с памятью / К.С. Слипенчук // Инфокоммуникационные технологии. – 2018. – Том 16. – №2. – С. 216 – 221.
2. Слипенчук, К.С. Система OFDM для канала с памятью и быстрыми замираниями / В.Г. Карташевский, Е.С. Семенов, К.С. Слипенчук, А.А. Филимонов // Радиотехника. – 2018. – №3. – С. 65 – 69.
3. Слипенчук, К.С. Прием сигналов OFDM в каналах с рассеянием / В.Г. Карташевский, К.А. Бельский, К.С. Слипенчук // Радиотехника. – 2015. – №2. – С. 62 – 68.
4. Слипенчук, К.С. Помехоустойчивость схемы приема OFDM сигналов в канале с памятью / К.С. Слипенчук, К.А. Бельский // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Том 12. – №4. – С. 37 – 40.

Публикации в научных изданиях, включенных в Scopus

5. Slipenchuk, K.S. The processing of OFDM system signals in dispersion channel / K.S. Slipenchuk, A.A. Filimonov // Processing of the 2020 IEEE conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (ElConRus) – 2020. – P. 1428 – 1432.

Патент на изобретение

6. Способ повышения помехоустойчивости приема OFDM сигналов в каналах с памятью // Карташевский В.Г., Слипенчук К.С., Бельский К.А. Патент RU 2618211 С2 от 07.09.2015 г., опубл. 03.05.2017.

Публикации в других научных журналах, трудах международных и всероссийских конференций

7. Слипенчук, К.С. Помехоустойчивость приема OFDM сигналов в каналах с рассеянием / К.С. Слипенчук // Тезисы докладов XXII Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ – Самара, 2015. – С. 81 – 82.
8. Слипенчук, К.С. Оценивание сигналов OFDM в каналах с рассеянием / К.С. Слипенчук // Тезисы докладов XXII Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ – Самара, 2015. – С. 82 – 83.
9. Слипенчук, К.С. Моделирование алгоритма приема OFDM сигналов/ К.С. Слипенчук // Вестник Алмаатинского университета энергетики и связи. – 2015. – №1. – С. 66 – 71.
10. Слипенчук, К.С. Оценивание импульсной характеристики канала с памятью при обработке сигналов OFDM / К.С. Слипенчук // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации: Сборник трудов V Международной научно-технической конференции – Тольятти, 2015. – С. 56 – 57.
11. Слипенчук, К.С. Оценивание импульсной характеристики сигналов OFDM в каналах с памятью / К.С. Слипенчук // Тезисы докладов Проблемы техники и техноло-

гий телекоммуникаций: Сборник трудов XVI Международной научно-технической конференции – Казань, 2016. – С. 93.

12. Слипенчук, К.С. Алгоритм вычислений оценки импульсной характеристики OFDM сигнала / К.С. Слипенчук // Тезисы докладов XXV Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ – Самара, 2018. – С. 44.

13. Слипенчук, К.С. Сравнение методов оценки импульсной характеристики / К.С. Слипенчук // Тезисы докладов XXVI Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ – Самара, 2019. – С. 23.

14. Слипенчук, К.С. Использование метода регуляризации для системы OFDM в каналах с памятью / К.С. Слипенчук // Тезисы докладов Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции – Казань, 2019. – С. 13 – 14.

15. Слипенчук, К.С. Методы оценивания в каналах с памятью / К.С. Слипенчук // Тезисы докладов XXVI Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ – 2019. – С. 22.

Подписано в печать .2020г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,375. Тираж 100 экз. Заказ № 1014733.

ИУНЛ ПГУТИ
443090, г. Самара, Московское шоссе, 77