

На правах рукописи



ЛЮБОПЫТОВ Владимир Сергеевич

**КОМПЕНСАЦИЯ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ЦИФРОВЫХ КАНАЛАХ
НА ОСНОВЕ ДРОБНО-ИНТЕРВАЛЬНОЙ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ**

**Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2013

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Научный руководитель: д-р техн. наук
Багманов Валерий Хусаинович

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, профессор
Мишин Дмитрий Викторович
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и
информатики», проректор по учебной работе

д-р техн. наук, с.н.с.
Коровин Валерий Михайлович
ОАО «Башнефтегеофизика»,
главный геофизик

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный университет
телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»**

Защита диссертации состоится «24» мая 2013 г. в 10:00 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.07
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
в актовом зале 1-го корпуса по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «18» апреля 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук, доцент



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Последние два десятилетия продемонстрировали стремительное развитие технологий широкополосного доступа, вызванное постоянным ростом потребности бизнеса и населения в мультисервисных информационных ресурсах, и в настоящее время наблюдается тенденция к дальнейшему увеличению числа пользователей широкополосных сетей. С другой стороны, на всех этапах развития информационно-коммуникационных технологий основными критериями при разработке систем связи остаются надежность, качество и скорость передачи информации.

При организации абонентского широкополосного доступа во многих случаях, особенно при невысокой плотности пользователей, наиболее экономически эффективным решением является применение беспроводных технологий передачи данных, или использование существующей кабельной инфраструктуры. В том числе возможно использование линий электропитания в качестве направляющих систем для передачи цифрового сигнала благодаря применению широкополосной технологии *PLC*.

Однако для данных типов каналов в наибольшей степени характерны искажения сигнала, вызванные частотной зависимостью параметров канала на ширине спектра передаваемого сигнала и эффектом многолучевого распространения. Если память канала оказывается больше длительности символа T , возникает эффект межсимвольной интерференции (МСИ), приводящий к росту вероятности ошибки и ограничивающий, таким образом, качество, скорость и расстояние передачи. Таким образом, надежная высокоскоростная передача информации по беспроводным каналам и линиям сетей *PLC* становится возможной благодаря внедрению современных методов модуляции, кодирования и коррекции сигнала.

Степень разработанности темы. Задача компенсации искажений в цифровых каналах при воздействии помех возникла сразу с появлением цифровых систем связи и имеет обширное историческое прошлое. Исследованиям в данной области посвящены работы таких ученых, как: Андреев В.А., Кисель В.А., Кловский Д.Д., Кульман Н.К., Курицын С.А., Мишин Д.В., Стратонович Р.Л., Тамм Ю.А., Тихонов В.И., Шахгильдян В.В., *Ericson T., Fischer R.F.H., Forney G.D., Gerstaker W., Gitlin R.D., Harashima H., Haykin S., Huber J., Laroia R., Lucky R.W., Miyakawa H., Monsen P., Qureshi S.U.H., Rudin H.R., Tomlinson M., Ungerböck G., Weinstein S.B.* и многих других.

Для компенсации МСИ возможно применение методов коррекции как на приемной, так и на передающей стороне канала, а также одновременное применение данных подходов. Причем коррекция на передающей стороне, благодаря обработке сигнала до наложения аддитивной помехи, позволяет избежать проблемы нежелательного усиления шума, возникающей в случае коррекции на приемной стороне.

Возможны два подхода к цифровой коррекции с точки зрения тактовой частоты обработки сигнала: T -интервальный (*T-spaced*) и дробно-интервальный (*fractionally spaced*). Наиболее простую реализацию предполагает T -интервальный подход, при котором тактовая частота цифровой обработки равна частоте

следования символов $1/T$. Однако в этом случае, поскольку спектр корректируемого сигнала периодически накладывается с периодом $1/T$, точность компенсации МСИ в реальных системах связи снижается по мере увеличения ширины спектра сигнала и неидеальности частотных характеристик канала.

Общим случаем с точки зрения выбора тактовой частоты является дробно-интервальная коррекция, при которой частота дискретизации и цифровой обработки сигнала $1/\tau$ превышает частоту следования символов $1/T$. При этом возникает возможность компенсации искажений на частотном интервале заданной ширины до периодического наложения спектров полезного сигнала, позволяющая адаптировать процесс коррекции к форме импульсов полезного сигнала и обеспечивает точную компенсацию МСИ независимо от формы частотной характеристики канала на ширине спектра передаваемого сигнала. Кроме того в данном случае не требуется синхронизации корректора с полезным сигналом.

Впервые анализ эффективности дробно-интервальной коррекции осуществил *G. Ungerböck* в 1976 году, показав ее преимущества по отношению к T -интервальной коррекции. В ряде последующих работ были представлены результаты моделирования дробно-интервальной коррекции на приемной стороне, демонстрирующие более высокие отношения сигнал-шум, чем в случае коррекции с частотой следования символов. Однако дробно-интервальный подход не рассматривается в известных источниках применительно к коррекции на передающей стороне канала. Таким образом, актуальной задачей в рамках повышения эффективности широкополосных систем передачи является разработка методов дробно-интервальной предварительной коррекции сигнала, позволяющих реализовать одновременно преимущества обработки сигнала на передающей стороне и дробно-интервального подхода к коррекции сигнала.

Объектом исследования являются проводные и беспроводные цифровые каналы сетей широкополосного доступа, характеризующиеся частотной зависимостью коэффициента передачи и эффектом многолучевого распространения, приводящими к возникновению межсимвольной интерференции.

Предметом исследования являются методы коррекции цифрового сигнала на передающей стороне канала на основе дробно-интервального подхода, параметры и эффективность реализации данных методов.

Целью работы является повышение эффективности использования цифровых каналов широкополосного доступа за счет компенсации межсимвольной интерференции, возникающей в результате искажения цифрового сигнала при передаче по данным каналам.

Задачи исследования.

1. Разработка метода, обеспечивающего снижение вероятности ошибки при приеме цифрового сигнала за счет компенсации межсимвольной интерференции, основанного на применении дробно-интервального подхода к коррекции сигнала на передающей стороне.

2. Разработка алгоритма реализации дробно-интервальной предварительной коррекции в цифровых системах связи и соответствующих программных и схемотехнических решений.

3. Разработка метода совместного применения дробно-интервальной предварительной коррекции и модуляции с расширением спектра, позволяющего в условиях аддитивной помехи с сосредоточенным спектром без увеличения мощности передаваемого сигнала снизить вероятность ошибки за счет повышения помехоустойчивости приема одновременно с компенсацией искажений.

4. Разработка методики расчета оптимальной ширины частотного интервала, на котором осуществляется предварительная коррекция, учитывающей форму импульсов передаваемого сигнала.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод компенсации межсимвольной интерференции в цифровых каналах, *основанный* на дробно-интервальной коррекции сигнала на передающей стороне, *отличающийся* возможностью компенсации искажений на частотном интервале заданной ширины, *позволяющий* повысить эффективность использования цифровых широкополосных каналов связи.

2. Разработан алгоритм реализации дробно-интервальной предварительной коррекции в системах связи, *основанный* на цифровой фильтрации сигнала, *отличающийся* инвариантностью по отношению к методам модуляции и помехоустойчивого кодирования и *позволяющий* снизить вероятность ошибки без дополнительной обработки сигнала на приемной стороне.

3. Разработан метод компенсации межсимвольной интерференции, *основанный* на совместном использовании дробно-интервальной предварительной коррекции и метода расширения спектра сигнала, *отличающийся* от известных возможностью компенсации межсимвольной интерференции одновременно со снижением средней мощности шума при детектировании сигнала, *позволяющий* при передаче сигнала по искажающему каналу с сосредоточенной по спектру аддитивной помехой обеспечить снижение вероятности ошибки без увеличения средней мощности передаваемого сигнала.

4. Разработана методика расчета оптимальной ширины частотного интервала предварительной коррекции, *основанная* на критерии минимума остаточной межсимвольной интерференции, *отличающаяся* возможностью компенсации искажений с учетом средней заданной мощности передаваемого сигнала, *позволяющая* адаптировать процесс коррекции к форме исходного цифрового сигнала.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов состоит в возможности использования разработанных методов предварительной коррекции при проектировании передающего оборудования телекоммуникационных сетей широкополосного доступа, в том числе совместно с существующими технологиям и протоколами передачи данных. За счет компенсации МСИ может быть уменьшена длительность символа передаваемого сигнала, и, следовательно, повышена скорость передачи информации в канале. При заданной скорости, благодаря снижению вероятности ошибки, возникает запас отношения сигнал-шум при детектировании сигнала, который может быть использован для повышения качества и надежности передачи информации, увеличения максимального расстояния передачи, или повышения энергетической эффективности системы связи. Разработан алгоритм и программный код вычисления коэффициентов корректирующего фильтра. Разработан аппаратный прототип предкорректора на базе *FPGA*.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены с использованием теории помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений, теории случайных процессов, теории обратных и некорректных задач, теории систем с распределенными параметрами, теории цифровой обработки сигнала, теории функций комплексной переменной, операторного исчисления и численных методов. Применены методы математического моделирования, в том числе компьютерного. Проведены экспериментальные исследования на основе разработанного аппаратного прототипа предкорректора.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод компенсации МСИ в цифровых каналах, основанный на дробно-интервальной коррекции сигнала на передающей стороне.
2. Алгоритм реализации дробно-интервальной предварительной коррекции в цифровых системах связи на основе цифровой обработки сигнала на заданном частотном интервале.
3. Метод обработки сигнала на передающей стороне, основанный на применении дробно-интервальной предварительной коррекции совместно с методом расширения спектра сигнала.
4. Методика расчета оптимальной ширины частотного интервала, на котором осуществляется предварительная коррекция, на основе критерия минимума остаточной межсимвольной интерференции.

Достоверность полученных результатов основана на использовании в теоретических построениях законов и подходов, справедливость которых общепризнанна, а также известного и корректного математического аппарата; вводимые допущения мотивированы фактами, известными из практики. Достоверность и обоснованность научных положений подтверждена соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Основные результаты работы обсуждались на: VII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», посвященной 150-летию со дня рождения А.С.Попова, Самара, 2008; Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа, 2009; XI и XIII Международных научно-технических конференциях «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Уфа, 2010 и 2012; 17-й Международной конференции *EUNICE 2011 «Energy-Aware Communications»*, Дрезден, Германия, 5-7 сентября 2011 г., а также на семинарах кафедры телекоммуникационных систем УГАТУ.

Результаты работы применены при выполнении научно-исследовательского проекта, реализуемого в рамках гранта Минобрнауки России по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 12 публикациях, в том числе в 3 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и в 7 публикациях в сборниках материалов международных и всероссийских конференций. Также по результатам работы получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержит 188 стр. машинописного текста, из которых основной текст составляет 138 стр., 24 рисунка, библиографический список из 101 наименования, приложения на 42 стр.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализирована структура современных и перспективных телекоммуникационных сетей в зависимости от используемой физической среды передачи сигнала, определено место проводных линий и беспроводных каналов в современных сетях передачи данных. Рассмотрена проблема искажений широкополосного сигнала вследствие частотной зависимости параметров канала и эффекта многолучевого распространения, приводящих к МСИ в принимаемом сигнале. Описывается модель системы передачи, в рамках которой решается задача компенсации МСИ.

Приведены краткий обзор и характеристики основных подходов и методов, применяемых в настоящее время в цифровых системах связи для компенсации искажений сигнала в условиях аддитивных помех (детектирование последовательностей по критерию максимального правдоподобия, линейная коррекция и коррекция с решающей обратной связью по критериям форсирования нуля и минимума среднеквадратичной ошибки, предкодирование Томлинсона-Харашимы, гибкое предкодирование).

Применяемые в большинстве случаев методы компенсации МСИ основаны на T -интервальном подходе, при котором тактовая частота корректора совпадает с частотой следования символов исходного сигнала $1/T$. Данный подход предъявляет минимальные требования к производительности корректора, но имеет ряд ограничений с точки зрения эффективности компенсации МСИ. При рассмотрении T -интервальной коррекции в частотной области видно, что полоса частот, внутри которой возможна компенсация искажений, лимитирована интервалом $[f_0 - 1/2T, f_0 + 1/2T]$, где f_0 – частота несущей. Однако в реальных системах связи ширина спектра импульсов превышает ширину полосы Найквиста, и T -интервальный корректор вынужден обрабатывать спектр дискретизированного сигнала, представляющий собой результат суммирования спектральных плотностей входного сигнала с периодом $1/T$. В случае существенно нелинейной ФЧХ, свойственной каналам с частотно-селективными замираниями и многолучевым распространением, в областях перекрытия спектров возникают резкие перепады модуля и аргумента спектральной плотности входного сигнала. В результате из-за конечного порядка корректирующего фильтра спектральная плотность сигнала в областях перекрытия спектра не может быть выровнена до константы согласно условию Найквиста. Поэтому компенсация искажений в случае коррекции как на приемной, так и на передающей стороне, будет неточной, а образующиеся глубокие минимумы модуля спектральной плотности потребуют от корректора значительного усиления, что

приведет к неоправданным энергетическим затратам. К тому же при T -интервальном подходе эффективность коррекции характеризуется высокой чувствительностью к фазе дискретизации, даже небольшая неточность синхронизации с полезным сигналом приведет к значительному снижению эффективности коррекции.

При дробно-интервальной коррекции цифровая фильтрация производится с тактовой частотой $1/\tau > 1/T$. В результате становится возможной компенсация искажений на заданном частотном интервале $[f_0 - f_m, f_0 + f_m]$, где $f_m \leq 1/2\tau$, что позволяет адаптировать процесс коррекции к форме импульсов цифрового сигнала. Поскольку коэффициент передачи дробно-интервального корректора и спектр сигнала на его выходе будут иметь период $1/\tau > 1/T$, становится возможной независимая компенсация искажений на обеих сторонах спектра полезного сигнала, что обеспечивает точность компенсации МСИ независимо от формы частотной характеристики канала в окрестностях частот $(f_0 - 1/2T)$ и $(f_0 + 1/2T)$. По этой же причине дробно-интервальная коррекция не требует синхронизации корректора с полезным сигналом.

Также возможность компенсации МСИ в заданном частотном диапазоне позволяет реализовать дробно-интервальную коррекцию совместно с другими технологиями обработки сигнала, в частности такими, как расширение спектра сигнала и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (*OFDM*).

Дробно-интервальный подход предъявляет более высокие требования к производительности корректора и предполагает больший объем вычислений при определении его коэффициентов. С другой стороны, текущий технологический уровень производства элементной базы для цифровой обработки сигнала и снижение стоимости вычислительных ресурсов позволяют реализовать дробно-интервальную коррекцию в сетях широкополосного доступа.

Во второй главе разрабатывается метод дробно-интервальной предварительной коррекции сигнала. Предложен метод совместного применения дробно-интервальной предкоррекции и расширения спектра сигнала. Анализируется влияние ширины частотного интервала предкоррекции на эффективность компенсации МСИ. Оценивается эффективность предкоррекции с точки зрения минимизации мощности передаваемого сигнала при заданном качестве передачи.

Предварительная коррекция предполагает установку корректирующего цифрового фильтра, обрабатывающего полезный сигнал $f_0(t)$ после помехоустойчивого кодирования и формирования импульсов цифрового сигнала. Рассмотрены два способа реализации предкоррекции, соответственно для систем, предусматривающих передачу низкочастотного сигнала, и для систем, в которых спектр передаваемого сигнала шириной ω_s переносится на частоту несущей $\omega_0 > \omega_s/2$. Во втором случае предполагается обработка комплексной огибающей полосового аналитического сигнала до умножения на сигнал несущей. Учитывается, что при передаче широкополосного сигнала на частоте несущей получаемый после демодуляции эквивалентный низкочастотный сигнал, вследствие искажений в канале, является комплексным независимо от метода модуляции. Поэтому в данном случае предусматривается отдельная цифровая обработка квадратурных составляющих с помощью соответствующих корректирующих фильтров (Рисунок 1). Также рассмотрен

принцип применения дробно-интервальной предкоррекции совместно с *OFDM* с целью минимизации защитного интервала *OFDM*-символа.

В общем случае при пакетной передаче данных вычисление коэффициентов корректирующего цифрового фильтра осуществляется в результате тестирования канала некоторым сигналом $g_0(t) = \mathcal{L}^{-1}\{G_0(p)\}$. Источником информации о передаточной функции канала $K_c(p)$ является сигнал $g(t)$, получаемый на его выходе в результате тестирования, дискретизируемый с частотой $1/\delta \geq 1/\tau > 1/T$. Если в системе передачи спектр сигнала переносится на частоту ω_0 , огибающая тестирующего сигнала на выходе канала является комплексной функцией, поэтому предусматривается анализ обеих его квадратурных составляющих. Получаемые отсчеты, либо вычисленные коэффициенты фильтра, отправляются одним пакетом по обратному каналу.

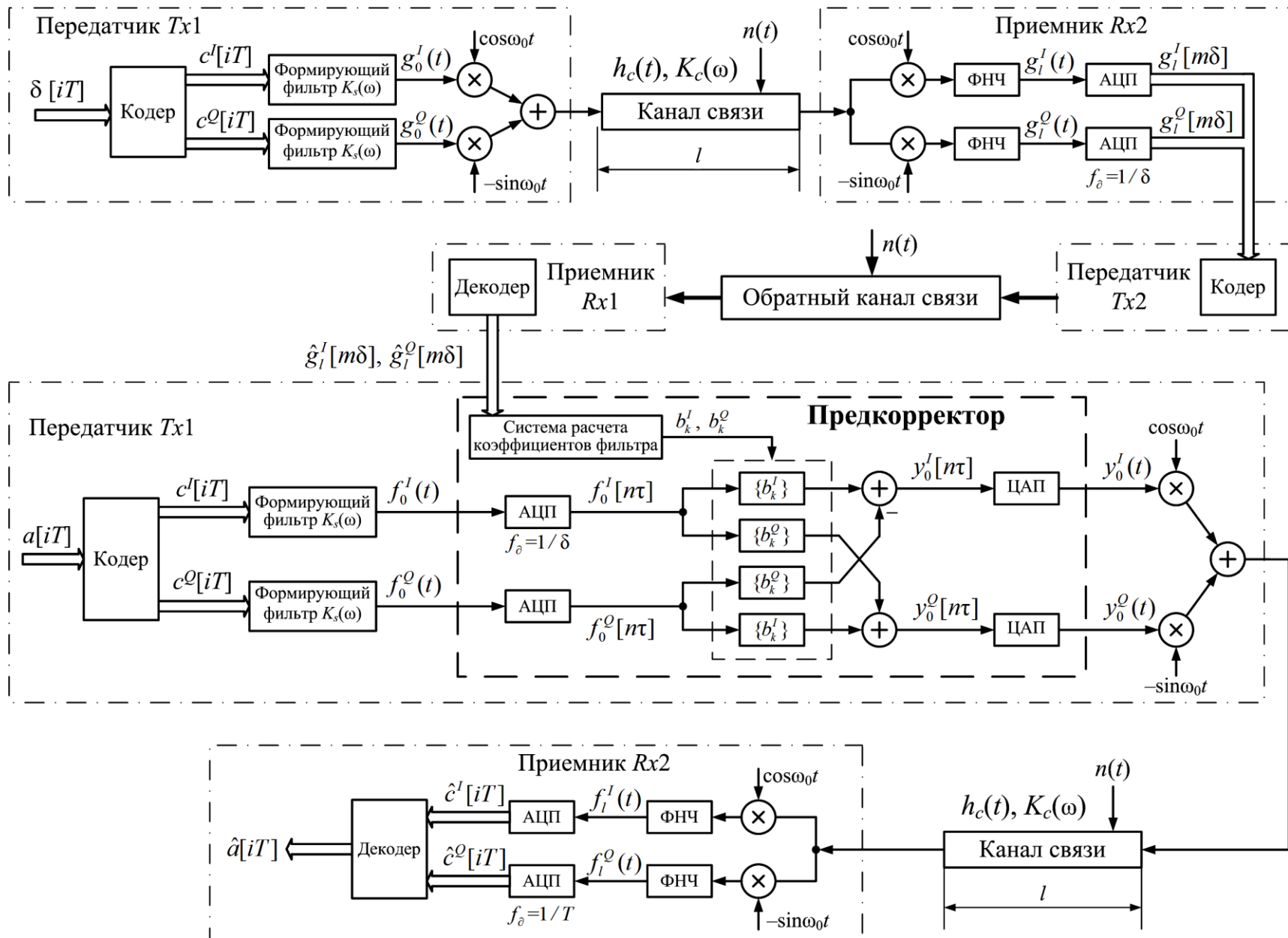
В качестве модели тестирующего сигнала предполагается использование импульса, представляющего символы полезного цифрового потока. При тестировании искажающего канала с памятью L символов длительность интервала, анализируемого при приеме тестирующего импульса, должна быть не менее LT , но не более времени корреляции коэффициента передачи канала. В работе представлен алгоритм выделения тестирующего импульса без влияния МСИ из заданной последовательности символов, содержащейся в заголовке кадра или внутри его информационной части.

Чтобы реализовать преимущества дробно-интервальной предкоррекции, процесс компенсации МСИ рассматривается в частотной области. При этом задача предварительной коррекции сигнала предполагает обращение причинно-следственных связей и потому является обратной задачей. Как известно, обратные задачи, описываемые интегральными уравнениями типа свертки, в общем случае могут проявлять некорректность вследствие стремления к нулю ядра уравнения с ростом частоты. Так как канал связи характеризуется в целом убывающим модулем передаточной функции, попытка поиска неизвестного сигнала может приводить к неустойчивому решению или неоправданно высоким затратам энергии. К тому же предкоррекция планируется посредством цифровой обработки, а оптимальный прием предполагает фильтрацию сигнала для ограничения мощности шума. Таким образом, ширина частотного интервала, подлежащего предкоррекции, изначально ограничивается некоторой частотой $\omega_m \leq \pi/\tau$.

Ограничение частотной области предкоррекции также позволяет избежать неопределенности при расчете коэффициентов фильтра, которая может возникать из-за отсутствия СПМ сигнала внутри частотного интервала $[-\pi/\tau; \pi/\tau]$ и приводить к неединственности набора коэффициентов корректирующего фильтра. В работе также учитывается, что для обеспечения физической реализуемости и стабильности предкорректора, импульсная характеристика (ИХ) канала должна быть аппроксимирована функцией, представляющей собой ИХ минимально-фазового фильтра.

Для корректного детектирования сигнала не требуется полной компенсации затухания в канале, достаточно обеспечить отношение сигнал-шум, необходимое для достижения заданного порога вероятности ошибки. Поэтому отношение между максимальными амплитудами сигнала на входе приемника и на выходе источника определяется коэффициентом $\lambda \leq 1$.

Рисунок 1 – Схема реализации предварительной коррекции сигнала в цифровой системе передачи



На основании полученных при тестировании значений сигнала $g_l[m\delta]$ осуществляется приближенный поиск импульсной характеристики аналогового прототипа предкорректора $h_p(t) = \mathcal{L}^{-1}\{K_p(p)\}$, имеющей ненулевую частотную характеристику только в окне $[-\omega_m; \omega_m]$ и используемой для синтеза корректирующего фильтра. Такой подход позволяет получить достаточно простой и универсальный алгоритм расчета коэффициентов фильтра независимо от вида передаточной функции канала. Задача поиска ИХ предкорректора в операторной форме определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} K_c(p)G_0(p) = G_l(p) \\ K_c(p)K_p(p) = \lambda\tau e^{-p\Theta} \end{cases} \quad (1)$$

где $K_c(\omega)$ – коэффициент передачи канала; Θ – временная задержка, необходимая для физической реализуемости предкорректора и равная времени пробега передаваемого сигнала по каналу связи. Поскольку линия является диспергирующей распределенной системой, значение Θ определяется наиболее медленной частотной составляющей.

Поскольку реакция канала на тестирующий сигнал до момента его прихода в точку приема при нулевых начальных условиях равна 0, тестирующий сигнал на выходе канала полностью описывается функцией $\tilde{g}_l(t)$, представляющей собой сигнал $g_l(t)$, сдвинутый влево по оси времени на Θ . Сигнал $\tilde{g}_l(t)$ после дискретизации аппроксимируется рядом единичных функций Хевисайда, тогда в операторной форме получаем:

$$\tilde{G}_l(p) = \frac{1}{p} \tilde{g}_l[0] + \frac{1}{p} \sum_{m=1}^M (\tilde{g}_l[m] - \tilde{g}_l[m-1]) e^{-pm\delta}, \quad (2)$$

где выбор значения $\tilde{g}_l[0]$, которое является первым отсчетом среди принятых значений $\tilde{g}_l[m\delta]$, обеспечивает аппроксимацию передаточной функции канала передаточной функцией минимально-фазового фильтра.

Таким образом, функция $\tilde{G}_l(p)$, представляющая собой ядро обратной задачи (1), является затухающей периодической функцией с периодом $2\pi/\delta$. Из (1) получаем:

$$h_p(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\lambda\tau G_0(p)}{\tilde{G}_l(p)} f(p, \omega_m) \right\}, \quad (3)$$

где $f(p, \omega_m)$ – стабилизирующий множитель.

При дальнейших вычислениях в качестве $g_0(t)$ рассматривается трапециевидальный импульс, являющийся достаточно общим случаем.

Рассмотрены два различных пути нахождения оригинала функции $h_p(t)$, являющейся приближенным решением данной обратной задачи. В первом случае используется численное интегрирование с помощью составной квадратурной формулы Ньютона-Котеса, обладающее простой реализацией, но предполагающее дискретизацию функций в частотной области. Такой подход накладывает ограничения на длительность обрабатываемого временного интервала. Во втором случае при вычислении интеграла Меллина-Фурье применяется метод

вычетов, позволяющий избежать дискретизации искомого сигнала по частоте, но требующий более сложных и объемных вычислений.

Получаемые дискретные комплексные значения приближенной ИХ аналогового прототипа $h_p[n\tau]$ позволяют сразу вычислить комплексные коэффициенты трансверсального корректирующего фильтра, обладающего гарантированной устойчивостью.

Также рассмотрена модификация метода для задачи определения ИХ на основании априорной приближенной информации о передаточной функции канала. Данный случай имеет значение для совместного применения предварительной коррекции и самонастраивающейся коррекции на приемной стороне (*blind equalization*). При этом эффективная компенсация МСИ может быть реализована без тестирования канала, то есть без снижения полезной пропускной способности.

Поскольку дробно-интервальная предкоррекция позволяет осуществлять компенсацию искажений в заданном частотном диапазоне, становится возможным ее применение совместно с технологией расширения спектра по методу прямой последовательности (*direct sequence spread spectrum, DSSS*). Как известно, модуляция с расширением спектра позволяет значительно повысить помехоустойчивость системы передачи в условиях сосредоточенных по спектру помех и широко используется в стандартах беспроводной связи и системах PLC. Предпосылкой к совместному использованию дробно-интервальной предкоррекции и расширения спектра является тот факт, что обе технологии предполагают дискретизацию передаваемого сигнала с частотой $1/\tau = W$, превышающей частоту следования символов сигнала $1/T$. В результате возможно последовательное применение операций расширения спектра и предварительной коррекции (Рисунок 2). Оборудование на приемной стороне усложняется только необходимостью демодуляции принятого сигнала с расширенным спектром.

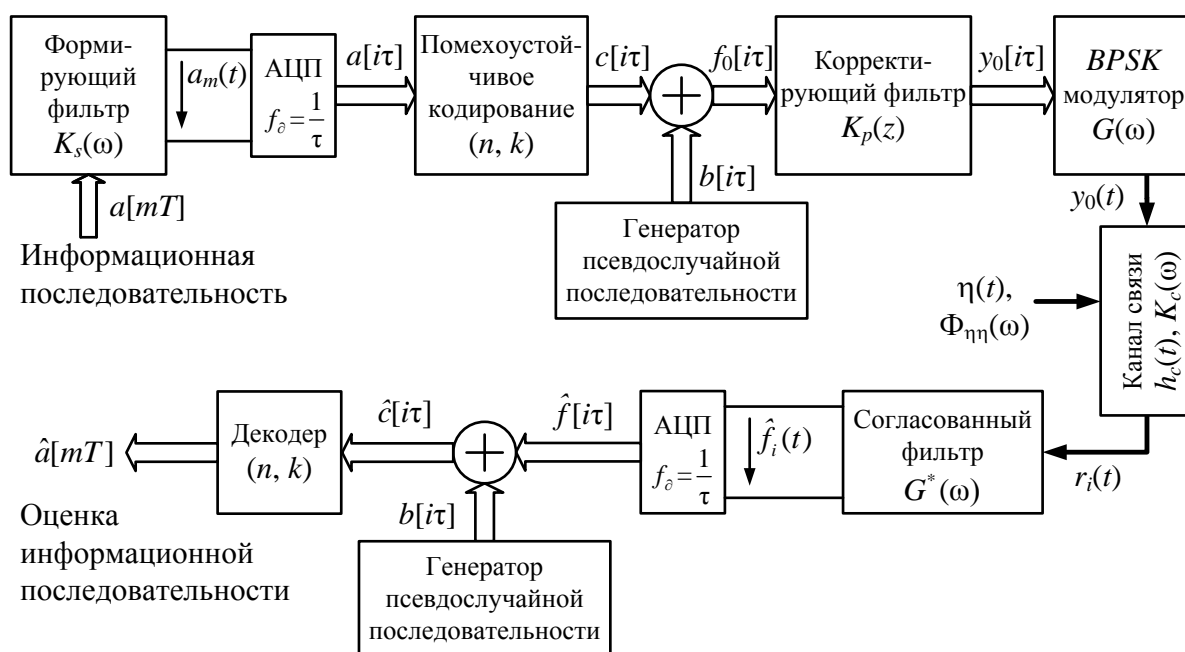


Рисунок 2 – Цифровая система передачи с дробно-интервальной предкоррекцией и расширением спектра сигнала

При разработке метода совместного применения предкоррекции и расширения спектра предполагается использование двоичной фазовой манипуляции (*BPSK*) сигнала с расширенным спектром. Учитывается, что дробно-интервальная предкоррекция по отношению к исходному информационному сигналу выступает в качестве *T*-интервальной по отношению к сигналу с расширенным спектром, поэтому для обеспечения отсутствия МСИ между импульсами в сигнале с расширенным спектром используется форма импульса расширяющей последовательности, удовлетворяющая условию Найквиста.

При использовании блочного кода (n, k) в условиях помехи, сосредоточенной в частотной полосе шириной $\omega_\eta \ll 2\pi W$, вероятность ошибки будет определяться как

$$P_M \leq \sum_{m=2}^{2^k} Q \left(\lambda \sqrt{2L_c \frac{P_{av}}{N_{av}} R_c w_m} \right), \quad (4)$$

где N_{av}/P_{av} – запас помехозащищенности, то есть максимальное значение отношения средних мощностей помехи и сигнала, при котором за счет доступного коэффициента расширения L_c еще достигается заданная вероятность ошибки; w_m – вес Хэмминга m -ого кодового слова; $R_c = k/n$ – скорость кода.

В результате одновременно реализуются преимущества двух технологий обработки сигнала в рамках обеспечения надежной передачи полезного сигнала по каналу со спектрально сосредоточенным аддитивным шумом и МСИ: *DSSS* позволяет повысить помехоустойчивость приема и устойчивость к многолучевому распространению, а предкоррекция компенсирует частотную зависимость параметров канала на интервале сигнала с расширенным спектром. В результате компенсация многолучевого распространения осуществляется без частичной потери энергии полезного импульса.

Проанализировано влияние, оказываемое на вероятность ошибки шириной частотного интервала, на котором осуществляется предкоррекция. Коэффициент λ и частота ω_m обуславливают снижение величины вероятности ошибки за счет повышения помехоустойчивости приема и снижения остаточной МСИ соответственно. Если импульсы полезного сигнала на выходе передатчика удовлетворяют второму условию Найквиста и ширина спектра импульсов соизмерима с шириной полосы Найквиста, например, амплитудный спектр имеет вид приподнятого косинуса, для детектирования символов принимаемого сигнала без влияния МСИ достаточно применения предкоррекции при $\omega_m = \pi(1+\beta)/T$, где $0 \leq \beta \leq 1$ – коэффициент ската. Если же ширина спектра полезного сигнала ω_s значительно превышает ширину полосы Найквиста, оптимальное значение частоты ω_m , ограничивающей частотный интервал предкоррекции, определяется путем решения оптимизационной задачи:

$$\tilde{D}_N(\omega_m) = \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{i=-N}^{-1} \left| \int_{-\omega_m}^{\omega_m} K_s(\omega) K_r(\omega) \cdot e^{j\omega(\tau_0 - iT)} d\omega \right| \rightarrow \min_{|\omega_m| \leq \pi/\tau}, \quad (5)$$

$$E_0^{(ПК)} = \frac{\lambda}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{\omega_m} \left| K_s(\omega) \frac{G_0(\omega)}{\tilde{G}_l(\omega)} \right|^2 d\omega \leq E_{th}, \quad (6)$$

где $\tilde{D}_N(\omega_m)$ – максимальная остаточная МСИ от N символов, $N = [(K-1)\tau/T]$ – объем выборки, K – порядок фильтра, $K_s(\omega)$ – коэффициент передачи формирующего фильтра передатчика, $K_r(\omega)$ – коэффициент передачи фильтра приемника, τ_0 – временное положение отсчета при детектировании символа, $E_0^{(ПК)}$ – энергия импульса на выходе предкорректора, E_{th} – заданное пороговое значение энергии импульса передаваемого сигнала.

В работе решение данной задачи оптимизации рассмотрено на примере прямоугольной формы импульсов.

В случае совместного применения предкоррекции и расширения спектра, при заданной верхней границе вероятности ошибки коэффициент λ связан с частотой ω_m соотношением $\lambda^2 \omega_m = const$.

Для оценки влияния компенсации МСИ на энергетическую эффективность передачи, оценивается величина запаса мощности $\gamma_0^{2(ПК)}$, равная отношению средних мощностей сигнала на выходе передатчика до и после применения предкоррекции при условии заданной вероятности ошибки. Показано, что в результате компенсации МСИ, в условиях гауссовского шума может быть получен запас мощности передаваемого сигнала по отношению к передаче без предкоррекции $\gamma_0^{2(ПК)} > 1$. Данный запас может быть также использован для повышения надежности и расстояния передачи.

При совместном применении предкоррекции и расширения спектра, запас мощности передаваемого сигнала зависит от доступного коэффициента расширения L_c и частотной характеристики канала. За счет коэффициента расширения $L_c \gg 1$ в условиях сосредоточенной по спектру помехи может быть получен соответствующий запас мощности $\gamma_0^{2(РСПК)} \gg 1$. Предкоррекция, в свою очередь, обеспечивает снижение вероятности ошибки за счет компенсации искажений в сигнале с расширенным спектром.

Третья глава посвящена разработке алгоритма и программного кода для расчета коэффициентов цифрового корректирующего фильтра. С целью имитационного моделирования процесса цифровой обработки полезного сигнала разработана программа для ЭВМ (язык программирования *Object Pascal*). Программа позволяет осуществлять приближенное вычисление ИХ предкорректора, предварительно скорректированного сигнала $u_0(t)$ для заданного импульсного сигнала $g_0(t)$ по дискретным значениям тестирующего импульса, получаемого на выходе канала, и определять коэффициенты корректирующего фильтра. В качестве исходных данных вводятся: частота дискретизации тестирующего и полезного сигналов; амплитуда и временные параметры тестирующего импульса; значения тестирующего импульса на выходе канала; частота ω_m ; временной интервал, в течение которого осуществляется коррекция; временной интервал, ограничивающий длительность используемого для расчета тестирующего сигнала; пороговое значение тестирующего импульса на выходе канала для обнаружения его переднего фронта; коэффициент λ ; масштаб квантования коэффициентов; амплитуды входного и выходного сигналов корректора. Возможно вычисление коэффициентов фильтра по известным первичным параметрам проводной линии

связи. Получаемые коэффициенты фильтра используются при последующей реализации аппаратного прототипа предкорректора.

С помощью программы может быть смоделирован процесс тестирования проводной линии, характеризуемой известными первичными параметрами. Кроме описанных функций, программа производит расчет остаточной МСИ в зависимости от заданной частоты f_m (МГц) согласно выражению (5), либо возможен поиск оптимального значения f_m в заданном диапазоне. В главе приводится описание интерфейса и функциональных возможностей разработанной программы.

Программа может быть использована в учебном процессе для проведения лабораторных работ по курсам, изучающим процессы цифровой обработки сигналов и коррекции цифровых сигналов.

В четвёртой главе представлены экспериментальные результаты дробно-интервальной предкоррекции цифрового сигнала в реальных каналах связи, а также рассмотрены вопросы практического применения предкоррекции в системах связи. Приводится описание разработанного аппаратного прототипа предкорректора, реализованного на базе *FPGA Altera Cyclone II* (*HDL*-описание выполнено на языке *VERILOG* с помощью программного пакета *Quartus II*). В качестве основного устройства экспериментальной установки использован лабораторный комплекс АПК-2008 производства Учебно-методического центра при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

При экспериментальном исследовании формы выходного сигнала в качестве среды передачи использовались сегменты сети электропитания, моделирующие условия распространения цифрового сигнала в широкополосных сетях *PLC*, где вследствие неидеальности частотной характеристики и многолучевого распространения существенно проявляется проблема МСИ, ограничивая качество, скорость и расстояние передачи. В случае частотно-селективной модели канала дробно-интервальная предкоррекция позволила практически полностью устранить уширение длительности символа, измеряемой на половине его амплитуды. В проведенных экспериментах при передаче импульсов, соответствующих частоте символов 8 МГц, относительное уширение импульса снизилось с 72,8% до 0,8÷4%. Также в значительной степени восстанавливается длительность заднего фронта импульса, уширение которого также является источником МСИ при детектировании сигнала.

Для моделирования неоднородной линии связи, в которой сигнал подвергается многолучевому распространению, использовалась линия, содержащая точку разветвления. В этом случае для принимаемого сигнала характерно наличие отраженных составляющих для каждого информационного символа. Проведенный в данных условиях эксперимент подтверждает возможность компенсации отраженных импульсов на сопротивлении нагрузки: относительное уширение импульса после применения предкоррекции не превысило 7,2%, относительная амплитуда отраженных составляющих снизилась с 30,5% до 12,7% .

Для экспериментальной апробации методики вычисления оптимальной частоты f_m , ограничивающей ширину полосы предкоррекции, и коэффициента λ , получены и проанализированы зависимости частоты битовых ошибок (*BER*) от

данных параметров при использовании линейных кодов *AMI* и *HDB3* в условиях белого гауссовского шума (Рисунок 3). В качестве полезного сигнала использовался цифровой поток *E1* 2,048 Мбит/с, форма импульсов которого определяется Рек. *ITU-T G.703*. Данный сигнал был выбран исходя из производительности *FPGA* таким образом, чтобы экспериментально исследовать в достаточно широких пределах влияние значения f_m на *BER* с помощью транспортного анализатора. Пунктиром показана вероятность ошибки без предкоррекции. Экспериментальные результаты, полученные при оптимальных параметрах f_m и λ , подтверждают эффективность применения предкоррекции с точки зрения минимизации вероятности ошибки.

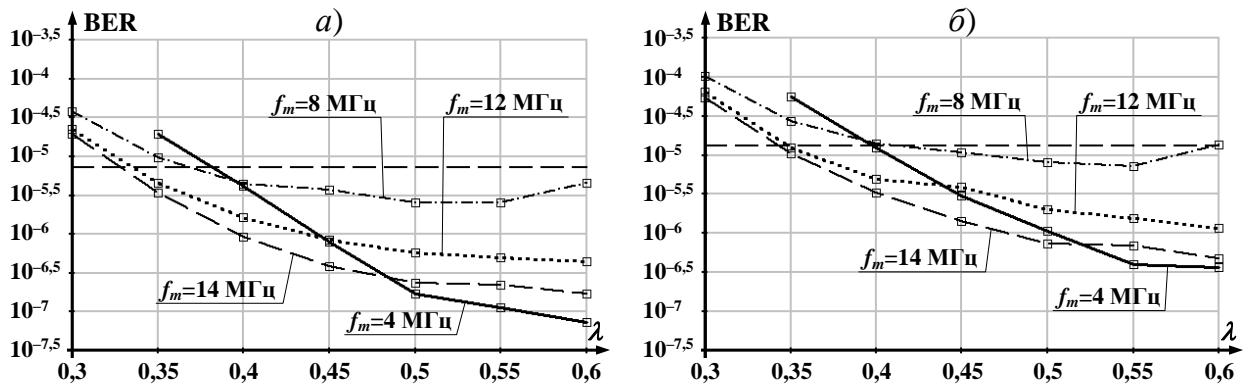


Рисунок 3 – Зависимости BER от λ и f_m , предкоррекция потока *E1* 2,048 Мб/с в условиях АБГШ: *a* – линейный код *AMI*; *б* – линейный код *HDB3*.

Также в главе рассмотрена функциональная схема реализации предварительной коррекции в цифровой системе связи, позволяющая производить тестирование канала, расчет и передачу коэффициентов корректирующего фильтра и соответствующую цифровую обработку полезного сигнала.

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложениях приведены: краткое описание основных существующих методов коррекции цифровых сигналов, код разработанной программы для ЭВМ, а также акты внедрения результатов работы в проектах ЗАО «Учебно-методический центр при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» и в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод коррекции цифрового сигнала на передающей стороне, основанный на цифровой обработке сигнала с использованием дробно-интервального подхода, отличающийся от известных возможностью компенсации искажений в заданном частотном диапазоне, позволяющий за счет компенсации межсимвольной интерференции получить запас отношения сигнал-шум при детектировании сигнала.

2. Разработан алгоритм реализации дробно-интервальной предварительной коррекции в цифровых системах передачи на основе цифровой обработки сигнала, отличающийся инвариантностью по отношению к методам модуляции и

помехоустойчивого кодирования, *позволяющий* снизить вероятность ошибки без дополнительной обработки сигнала на приемной стороне.

3. Разработан метод обработки сигнала на передающей стороне, *основанный* на совместном применении дробно-интервальной предварительной коррекции и расширения спектра цифрового сигнала, *отличающийся* от известных обеспечением компенсации межсимвольной интерференции одновременно с увеличением отношения сигнал-шум на входе решающего устройства в число раз, равное коэффициенту расширения спектра, *что позволяет* снизить вероятность ошибки при передаче сигнала в условиях аддитивной помехи с сосредоточенным спектром без увеличения мощности передаваемого сигнала, или уменьшить среднюю мощность передаваемого сигнала без снижения качества приема.

4. Разработана методика вычисления оптимальной ширины частотного интервала, подлежащего предварительной коррекции, *основанная* на критерии минимума остаточной межсимвольной интерференции, *отличающаяся* возможностью компенсации искажений при минимальной мощности передаваемого сигнала, *позволяющая* повысить качество передачи информации в цифровых каналах связи.

5. В результате экспериментов на реальных линиях связи установлено, что благодаря применению предварительной коррекции относительное уширение импульса цифрового сигнала как в случае прямолинейной, так и в случае разветвленной структуры канала, не превышает 7,2%. Результаты экспериментов по предкоррекции при оптимальных параметрах на примере потока $E1$ в условиях аддитивного гауссовского шума показали возможность снижения частоты битовых ошибок на величину до 43% без увеличения мощности передаваемого сигнала, а также продемонстрировали надежную связь в условиях линии связи с многолучевым распространением сигнала.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется разработка методов и алгоритмов совместного применения предварительной дробно-интервальной коррекции и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением, а также разработка алгоритма тестирования для предварительной коррекции в проводных каналах с многолучевым распространением, который позволил бы автоматически определять его текущее состояние на основе формы отраженного тестирующего воздействия, принимаемого на передающей стороне.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Анализ процесса распространения сигнала в поврежденной кабельной линии / Султанов А.Х., Глявлин А.З., Гильманов Э.А., Зайнуллин Р.Ф., Любопытов В.С. // Телекоммуникации: ежемесячный производственный, информационно-аналитический и учебно-методический журнал. М: Издательство «Наука и Технологии». 2010. №1. С. 7-9.

2. Метод предварительной коррекции сигнала для компенсации линейных искажений в металлических кабельных линиях / Султанов А.Х., Глявлин А.З., Любопытов В.С. // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. ун-та. УГАТУ. 2011. Т. 15. № 1 (41). С. 182-187.

3. Метод совместного применения дробно-интервальной предварительной коррекции и расширения спектра цифрового сигнала для *PLC*-сетей и беспроводных каналов связи / Багманов В.Х., Любопытов В.С., Султанов А.Х., Глявлин А.З. // Инфокоммуникационные технологии: периодич. науч.-техн. и информационно-аналитический журнал. ПГУТИ. 2012. Том 10. № 3. С. 20-28.

В других изданиях

4. Повышение эффективности использования направляющих систем при передаче цифрового сигнала / Глявлин А.З., Зайнуллин Р.Ф., Любопытов В.С. // Физика и технические приложения волновых процессов: VII Международная НТК. Самара: СамГУ, 2008. С. 87-88.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008612899. Моделирование процесса распространения прямоугольного импульса по однородной длинной линии / Любопытов В.С., Глявлин А.З., Зайнуллин Р.Ф. Роспатент. М.: Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 16.06.2008.

6. Повышение эффективности направляющих систем при передаче цифрового сигнала / Глявлин А.З., Багманов В.Х., Любопытов В.С. // Мавлютовские чтения: материалы Всероссийской молодежной научной конференции. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 136-137.

7. Метод предварительной обработки сигнала для коррекции линейных искажений в металлических кабельных линиях / Глявлин А.З., Любопытов В.С. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: XI Международная научно-техническая конференция. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 63-64.

8. Метод предыскажения сигнала для компенсации линейных искажений в металлических кабельных линиях / Любопытов В.С. // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник трудов 6-й Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 92-96.

9. Метод компенсации линейных искажений в проводных кабельных линиях / Султанов А.Х., Глявлин А.З., Любопытов В.С. // *EUNICE 2011 Energy-Aware Communications*: Сб. докладов 17-й Международной Конференции, г. Дрезден. Берлин: Изд-во *Springer-Verlag*, 2011. С. 195-198 (статья на англ. языке).

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618601. Расчет коэффициентов цифрового фильтра для предварительной коррекции сигнала / Любопытов В.С., Глявлин А.З., Багманов В.Х. Роспатент. М.: Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 21.09.2012.

11. О совместном применении дробно-интервальной предварительной коррекции и расширения спектра цифрового сигнала / Любопытов В.С. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: XIII Международная научно-техническая конференция. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 56-58.

12. Оптимизация предварительной коррекции цифрового сигнала в частотной области / Любопытов В.С. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: XIII Международная научно-техническая конференция. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 58-61.

ЛЮБОПЫТОВ Владимир Сергеевич

КОМПЕНСАЦИЯ МЕЖСИМВОЛЬНОЙ
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В ЦИФРОВЫХ КАНАЛАХ
НА ОСНОВЕ ДРОБНО-ИНТЕРВАЛЬНОЙ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 16.04.2013. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 232.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-Центр, К.Маркса, 12