

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор, проректор по НИИР

доктор технических наук, профессор

В.Г. Прокошев

« 7 октября 2016 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и
Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)
на диссертацию аспиранта кафедры радиотехники и
радиосистем Поздняковой Лидии Васильевны
на тему «Развитие методов коррекции комплексной
передаточной характеристики в системах с ортогональным
частотным разделением каналов и мультиплексированием»,
представленную на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в
том числе системы и устройства телевидения**

Кандидатская диссертация «Развитие методов коррекции комплексной передаточной характеристики в системах с ортогональным частотным разделением каналов и мультиплексированием» выполнена в ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» на кафедре радиотехники и радиосистем. В период подготовки соискатель Позднякова Лидия Васильевна обучалась в аспирантуре ВлГУ по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. В 2014 г. окончила ВлГУ и получила диплом магистра с отличием по специальности «Радиотехника».

Справка об обучении выдана 30.09.2016 г. ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и радиосистем ВлГУ Никитин Олег Рафаилович.

По результатам рассмотрения кандидатской диссертации «Развитие методов коррекции комплексной передаточной характеристики в системах с ортогональным частотным разделением каналов и мультиплексированием» принято следующее заключение:

Актуальность темы

При передаче широкополосного сигнала возникают его искажения из-за неидеальности комплексной передаточной характеристики, обусловленные, как самим каналом передачи, так и неидеальностью передатчика и приемника. Для правильной демодуляции такого искаженного сигнала необходимо скорректировать влияние комплексной передаточной характеристики на всем пути следования радиосигнала. Такая коррекция, в зависимости от свойств стационарности канала, может производиться в реальном времени или периодически. Условием правильного выполнения коррекции является временная, таковая и частотная синхронизация.

Патентная проработка, а также анализ научной литературы по использованию в современной радиоэлектронной технике методов цифровой обработки сигналов свидетельствуют о том, что вопросы, связанные с реализацией высокоскоростных алгоритмов коррекции комплексной передаточной характеристики канала на современной элементной базе, недостаточно проработаны. Это означает, что существует актуальная научная и техническая задача разработки и реализации алгоритмов компенсации влияния комплексной передаточной характеристики на принятый сигнал, а также алгоритмов временной и тактовой синхронизации.

Автор рассматривает задачу корректировки комплексной передаточной характеристики (КПХ) канала связи OFDM при выполнении временной синхронизации. Разработанный алгоритм коррекции КПХ оптимизирован для его реализации в современных программируемых логических интегральных схемах. Так, алгоритм использует только операции сложения, вычитания, умножения и деления и оперирует только целыми числами. Значительное внимание удалено временной, тактовой и частотной синхронизации по преамбуле. Предложен новый способ временной синхронизации, по которому подана заявка на патент.

Целью исследования является разработка и моделирование алгоритма коррекции комплексной передаточной характеристики, обеспечивающего снижение требований к ресурсам, необходимым для его реализации при поддержании временной и тактовой синхронизации.

Методы исследований

В работе использованы методы математической статистики, спектрального анализа и математического моделирования реализованного на компьютерном языке высокого уровня и языке описания аппаратуры.

Научная новизна работы заключается в развитии метода коррекции комплексной передаточной характеристики, также в создании методики временной, тактовой и частотной синхронизации, необходимой для функционирования предложенного метода коррекции:

1. Разработан быстродействующий алгоритм компенсации влияния комплексной передаточной характеристики на основе преамбулы и пилот-

поднесущих. Обоснован выбор уровня пилот-поднесущих по отношению к уровню данных. Даны рекомендации по использованию разделения преамбулы на символы.

2. Разработаны алгоритмы временной, тактовой и частотной синхронизации при использовании преамбулы, содержащей один, два или более двух символов, каждый из которых во временной области не имеет повторяющихся участков, а в частотной области содержит дискретно-непрерывный набор спектральных компонент.

3. Показано, что неравномерность группового времени запаздывания в пределах длины циклического префикса не влияет на работоспособность предложенных алгоритмов.

Практические результаты диссертации были достигнуты в процессе выполнения научно-исследовательских работ по договору о предоставлении гранта Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Перечень результатов, имеющих практическую ценность:

1. Применение разработанного алгоритма компенсации влияния комплексной передаточной характеристики на основе преамбулы и пилот-поднесущих позволило уменьшить количество занимаемых логических элементов на ПЛИС с 42400 до 38120.

2. Использование повышенного уровня пилот-поднесущих по сравнению с уровнем сигнала позволило на 1,3 дБ снизить требования к отношению сигнал/шум по отношению к стандартному алгоритму.

3. Созданы программы моделирования коррекции КПХ, которые позволили оценить погрешность коррекции при разных соотношениях сигнал/шум.

4. Создана программа моделирования алгоритма временной синхронизации, которая позволяет оценивать минимальное соотношение сигнал шум для выбранной преамбулы. Для преамбулы имеющей полезную длительность 1024 отсчета это соотношение составило -6 дБ.

Апробация работы

По материалам диссертации автором сделано 2 доклада на научной конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ-2015» (Владимир-Сузdalь, 2015). Подана заявка на патент на изобретение. Получено 3 авторских свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Внедрение теоретических и практических результатов работы произведено на ООО «Предприятие по модернизации авиационных комплексов». Программные средства на основе разработанных алгоритмов применяются в учебном процессе на кафедре радиотехники и радиосистем (РТ и РС) ВлГУ.

Проведены испытания *OFDM* модемов, в основе которых реализованы алгоритмы временной, тактовой синхронизации и коррекции комплексной передаточной характеристики.

Публикации по работе

По тематике исследований опубликовано 14 работ, из которых 6 в журналах из перечня рекомендованных ВАК.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Общий объём диссертации 167 страниц.

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации. Сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическое значение.

В первой главе рассмотрена технология ортогонального частотного разделения каналов с мультиплексированием (*OFDM*), описаны особенности и основные преимущества технологии *OFDM*.

Рассмотрены задачи и методы синхронизации приёмо-передающих устройств в *OFDM* – системе связи, а именно, временная, тактовая и частотная синхронизация.

Рассмотрены особенности и недостатки основных методов определения комплексной передаточной характеристики системы связи на основе ортогонального частотного разделения каналов с мультиплексированием по преамбуле. Рассмотрено применение пилот-поднесущих для подстройки комплексной передаточной характеристики.

Аналитический обзор позволил сформулировать задачи дальнейших исследований, а также основные пути и средства для их решения.

Во второй главе исследуются способы расчета и коррекции комплексной передаточной характеристики (КПХ) системы связи на основе *OFDM*, рассматривается алгоритм определения оптимальной по пик-фактору преамбулы для предложенного способа коррекции КПХ, способ временной синхронизации, использующий априорную информацию о преамбуле, а также алгоритм тактовой и частотной синхронизации.

Для упрощения реализации на аппаратном уровне алгоритмов работы *OFDM* системы связи и снижения требований к скорости выполнения операции деления создан алгоритм коррекции КПХ канала на основе разделения преамбулы на 2 символа и исключении из алгоритма процедур перевода в полярную систему координат и обратно. Проведено сравнение с известными методиками расчёта. Даётся обоснование расчётов в декартовой системе координат без перехода в полярную систему.

Показано, что использование предложенного алгоритма позволило:

- сократить количество шагов алгоритма на 8 позиций;
- отказаться от перевода из ортогональной системы координат в полярную систему координат и обратно;
- отказаться от использования аппроксимации при расчете обратной комплексной передаточной характеристики по преамбуле.

Предложен алгоритм для работы с целыми 32х битными числами вместо вещественных, который позволяет упростить его реализацию на языках описания аппаратуры, таких, как Verilog. Для реализации алгоритма коррекции с использованием целочисленного деления и целых 32х битных чисел были найдены нормирующие коэффициенты, которые позволили сохранить точность расчета обратной КПХ. Моделирование целочисленного алгоритма коррекции КПХ при работе с отношением сигнал/шум до 36 дБ показало отсутствие потери точности в сравнении с вещественным алгоритмом. Алгоритм функционирует в диапазоне минимального входного значения сигнала $\pm 2^{\text{битность АЦП-1}}/32$, максимального входного значения сигнала $\pm 2^{\text{битность АЦП-1}}$.

Показано, что возможна оценка массива комплексного коэффициента передачи в интервале передачи не одного, а нескольких символов с разделением во времени частот испытательного линейчатого спектра.

Предложено разделить преамбулу на два символа, так как если передавать преамбулу в двух символах, то число спектральных компонент в каждом из них будет уменьшено в два раза. Тогда при сохранении мощности уровень этих компонент поднимается в $\sqrt{2}$ раз. Для того же уровня шума отношение С/Ш тоже возрастет в $\sqrt{2}$ раз, поэтому погрешность расчета ККП уменьшится.

Использование компонент стандартной преамбулы (*WiMAX 802.16.2004*) в разработанном методе коррекции КПХ приводит к возрастанию пик-фактора в 1,53 раза.

Разработана компьютерная программа расчета коэффициентов преамбулы для поиска ее оптимального по пик-фактору варианта. Показано, что при использовании разработанной программы за 100 миллионов итераций удалось найти коэффициенты преамбулы, которые для ВЧ части позволили получить пик-фактор 1,78 и для НЧ части 1,73. Модифицированная преамбула по сравнению со стандартной позволила повысить ее энергию в 1,5 раза для предложенного алгоритма коррекции.

Показано, что известные способы временной синхронизации работают с преамбулами, которые имеют повторяющиеся участки во временной области. Т.к. разработанный способ коррекции комплексной передаточной характеристики системы связи *OFDM* использует преамбулу, имеющую дискретно-непрерывный набор спектральных компонент, т.е. не имеющую повторяющихся участков во временной области, то известные способы синхронизации не могут быть использованы.

Предложен способ временной синхронизации, в котором решающая функция представляет собой квадрат модуля комплексной функции взаимной корреляции принятого сигнала и эталонной преамбулы без циклического префикса, которая не передавалась через канал передачи, а была заранее известна.

В работе, преамбула представляет собой дельта - коррелированный шумоподобный сигнал. Использование именно этого свойства при обработке приводит к повышению точности за счет резкого сужения области максимума решающей функции. Преамбула для предлагаемого способа может содержать один, два или более двух символов, каждый из которых во временной области не имеет повторяющихся участков. Это необходимо, чтобы максимум решающей функции был один для каждого символа, который используется для синхронизации.

Для определения временного положения преамбулы целесообразно использовать сумму значений решающей функции на участке значимости вместо значения максимума решающей функции.

Использование функции взаимной корреляции и непрерывной по частотным компонентам преамбулы позволяют произвести временную синхронизацию даже при отношении сигнал шум -6 дБ без ложных обнаружений и пропусков для выборки из 100 000 реализаций.

Рассмотрено применение временной синхронизации для реализации тактовой. В случае если генератор опорной частоты является единым для частоты дискретизации и несущей частоты радиосигнала, то подстраивая по разработанному алгоритму генератор опорной частоты, чтобы выровнять частоту дискретизации абонентской станции по базовой станции также будет происходить частотная синхронизация по несущим частотам. Эта особенность позволяет одновременно с тактовой синхронизацией получить и частотную.

В третьей главе проведено сравнение способов расчета и коррекции КПХ системы связи *OFDM* с использованием в расчетах полярной системы координат и без ее применения. Показаны результаты моделирования с использованием разработанных для ЭВМ программ.

Помехоустойчивость предложенного алгоритма коррекции КПХ на 1,3 дБ выше по сравнению с алгоритмом, использующим в расчетах полярную систему координат.

При модификации предложенного алгоритма для работы с целочисленными значениями потери точности не произошло. Данная модификация позволяет реализовать предложенный алгоритм коррекции на языках описания аппаратуры *Verilog* или *VHDL*.

Разбиение преамбулы на 2 символа дает хороший выигрыш по помехоустойчивости. Дальнейшее разбиение преамбулы на символы не приводит к столь значительному выигрышу в помехоустойчивости вследствие неизменного уровня спектральных составляющих в символах данных. При разбиении преамбулы на 2 символа для работы модуляции *QAM16* 2/3 требуется отношение С/Ш=20,2 дБ, для *QAM64* 2/3 - 27,4 дБ.

В работе представлено описание результатов апробации и внедрения разработанных методик и алгоритмов. Приводится описание алгоритмов цифровой обработки и средств моделирования.

ВЫВОДЫ:

1. Тема диссертации актуальна, а ее содержание логически взаимосвязано и базируется на современных источниках.
2. Все защищаемые положения получены лично автором, выводы и рекомендации научно обоснованы и достоверны, они могут быть полезны для разработчиков средств связи.
3. Работа соответствует всем требованиям, в ней решены научно-практические задачи оценки параметров радиоканала, которые подтверждены результатами моделирования и натурными испытаниями разработанных методик и алгоритмов.
4. Тема и содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
5. Содержание работы соответствует требованиям, регламентируемым восьмым пунктом «Положения ВАК о порядке присуждении ученых званий и степеней».

Диссертация «Развитие методов коррекции комплексной передаточной характеристики в системах с ортогональным частотным разделением каналов и мультиплексированием» Поздняковой Лидии Васильевны рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Заведующий кафедрой радиотехники
и радиосистем ФГБОУ ВО
«Владимирский государственный
университет имени Александра
Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых»
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ



O.P. Никитин