

На правах рукописи



КАЗАЧКОВ Виталий Олегович

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА СТАНДАРТА LTE

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2015

Работа выполнена на кафедре «Инфокоммуникации» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент кафедры 408
Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
Важенин Николай Афанасьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, генеральный директор ООО
«Научно-производственная фирма «САД-КОМ»
Дворкович Александр Викторович

доктор технических наук, главный специалист
департамента радиотехнологий ОАО «Интеллект Телеком»
Мартынов Владимир Иванович

Ведущая организация: ОАО "Московский научно- исследовательский
институт радиосвязи" (ОАО "МНИИРС")

Защита диссертации состоится «21» апреля 2015 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.125.02 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ma1.ru и в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.125.02
к.т.н, доцент



Петраков А.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Современному человеку трудно представить жизнь без средств сотовой связи, причем если изначально этот вид связи использовался в основном для передачи голосовой информации и коротких сообщений, то в последние годы, как в целом в мире, так и в России, отмечается резкий рост интернет трафика мобильных абонентов

Одним из перспективных направлений развития систем мобильной связи является стандарт связи LTE (Long Term Evolution). Стандарт разработан консорциумом 3GPP (3rd Generation Partnership Project) и в первоначальном варианте был назван как релиз 8 (Release 8). За последние годы стандарт прошел несколько этапов своего развития, были выпущены более новые релизы, и начиная с релиза 10 (Release 10) стандарт был официально признан Международным Союзом Электросвязи (МСЭ) технологией 4 поколения (4G - 4 generation), при этом начиная с 10 релиза стандарт получил название LTE-Advanced (LTE-A). Ключевыми особенностями стандарта стали возможность передачи данных на больших скоростях (целевыми значениями для системы является 1 Гбит/с для нисходящего направления передачи и 500 Мбит/с для восходящего), система поддерживает работу с мобильными абонентами, передвигающимися на скорости до 350 км/ч, возможность масштабирования полосы сигнала (от 1.4 до 20 МГц), кроме того, начиная с 10 релиза, поддерживается агрегация до 5 несущих, что предоставляет возможность создания системы с полосой сигнала в 100 МГц и т.д.

С точки зрения реализации систем мобильной связи перспективным направлением считаются системы программно-определяемого радио (Software Defined Radio). Такие устройства обладают свойством поддержки работы с различными стандартами связи и в ближайшем будущем должны будут обеспечить поддержку всех существующих стандартов связи и видов модуляции в одном устройстве. Также программируемая архитектура позволяет создавать системы когнитивного радио (Cognitive Radio). Когнитивное радио – это еще одна технология, позволяющая добиться более рационального использования частотного ресурса. Система когнитивного радио сканирует частотный диапазон и находит частоты, на которых временно или постоянно никто не вещает и использует их для передачи сигнала. Таким образом, разработка интеллектуальных устройств, к которым относятся описанные выше системы, это востребованное направление дальнейшего развития систем связи. Однако, в таких системах возникает необходимость идентификации вида модуляции принимаемого сигнала и постоянный анализ его основных характеристик, что делает данное направление исследования востребованным и **актуальным**.

Направления идентификации и определения параметров сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) активно развивались в последние 20 лет (в основном за рубежом) и в настоящее время существует множество методов, предназначенных для решения задач идентификации и определения параметров. Однако, аналогичные исследования стандарта LTE практически не проводились. Ряд обобщенных для OFDM систем методов применим и к сигналу LTE, но учет особенностей сигнала позволит повысить точность методов идентификации сигнала и оценки его параметров. Таким образом, в настоящее время задача идентификации LTE сигнала и определения его параметров **в полной мере не решена**.

Совместное использование алгоритмов идентификации и оценки параметров сигнала стандарта LTE с процедурами, прописанными в стандарте, позволит модернизировать существующие устройства и повысить их точность. Методы идентификации и оценки параметров стандарта LTE позволят осуществлять внешний контроль за состоянием системы, её характеристиками и эффективностью использования выделенных ресурсов.

В перспективе на основе методов по идентификации и оценке параметров возможна разработка систем сотовой связи с меньшим количеством опорных и служебных сигналов, что позволит использовать освобожденные ресурсы для передачи информации от абонентов, повысить эффективность использования выделенных частотных ресурсов, а также повысить скорость передачи данных. Перечисленное выше подтверждает **актуальность** и высокую перспективность разработки методов по идентификации и оценке параметров сигнала стандарта LTE.

Возможность решения задач идентификации и оценки параметров без использования служебной информации, а как следствие и без необходимой для этого процедуры регистрации в сети, также позволяет применить разработанные методы как в гражданских целях: в пассивных радиоизмерительных системах, например, при решении задач радиомониторинга, так и в военных - в задачах радиоразведки.

Цель работы и решаемые задачи

Целью работы является разработка и исследование математических моделей, методов и алгоритмов для идентификации и оценки параметров сигнала стандарта LTE на основе априорной информации о структуре и характеристиках такого сигнала. В соответствии с указанной целью в данной работе ставятся следующие задачи:

1. Анализ существующих методов идентификации и оценки параметров.
2. Разработка алгоритма автоматической идентификации для сигнала стандарта LTE.

3. Разработка алгоритмов для оценки параметров сигнала стандарта LTE.
4. Имитационное моделирование и исследование разработанных алгоритмов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовался аппарат математической статистики и теории вероятности, теории электрической связи, методы математического анализа, а также имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink.

Научная новизна работы

1. Разработан алгоритм автоматического распознавания LTE сигнала.
2. Разработана методика определения полосы сигнала стандарта LTE. На имитационной модели в ходе анализа экспериментальных данных показана эффективность данной методики при наличии помех в канале.
3. Разработана методика определения отношения сигнал/шум в полосе сигнала по циклическому префиксу.
4. Исследовано влияние ошибок символьной синхронизации на точность разработанной методики определения отношения сигнал/шум в полосе сигнала по циклическому префиксу.
5. Предложена методика вычисления корреляционной функции для последовательностей Задова-Чу. Методика обеспечивает более высокую точность вычисления максимума корреляционной функции при наличии шума в канале и частотной отстройке в сравнении с известными методами.
6. Модифицирована методика идентификации вида модуляции на поднесущих для сигнала стандарта LTE.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенные методики и алгоритмы идентификации и оценки параметров позволяют выполнить данные операции даже при низких значениях отношения сигнал/шум и на фоне воздействия замираний, что делает возможным их применение в реальных программно-определяемых радиосистемах, в системах когнитивного радио, в системах анализа цифровых сигналов, при решении задач радиомониторинга и радиоразведки.

Выявлено, что циклический префикс может использоваться не только для борьбы межсимвольной интерференцией и выполнения процедуры символьной синхронизации, но и для идентификации и оценки полосы сигнала стандарта LTE.

Также результаты работы используются в цикле учебной дисциплины «Модельно-ориентированное проектирование систем подвижной радиосвязи» по специальности 210402 «Средства связи с подвижными объектами», а также учебной дисциплины «Модельно-ориентированное проектирование инфокоммуникационных систем» по направлению подготовки 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика автоматического распознавания LTE сигнала обеспечивает вероятность правильной идентификации не менее 85% при отношении сигнал/шум от -5 до 30 дБ на фоне АБГШ и замираний.

2. Разработанная методика определения полосы сигнала стандарта LTE обеспечивает вероятность правильной оценки не менее 85% при отношении сигнал/шум от -5 до 30 дБ на фоне АБГШ и замираний.

3. Предложенная методика определения отношения сигнал/шум в полосе сигнала по циклическому префиксу, обеспечивает СКО оценки не более 0.11 дБ в диапазоне значений отношения сигнал/шум от -5 до 30 дБ.

4. Предложенная методика вычисления корреляционной функции для последовательностей Задова-Чу позволяет добиться снижения вероятности ложного определения максимума корреляционной функции до 18% при наличии частотной отстройки до 7.5 кГц при отношении сигнал/шум 0 дБ на фоне АБГШ и замираний. При отсутствии частотной отстройки методика превосходит по точности известные при отношении сигнал/шум менее 12 дБ и позволяет снизить вероятность ложного определения максимума корреляционной функции до 15%.

5. Модифицированная методика идентификации вида ФМ-2 модуляции на поднесущих для сигнала стандарта LTE обеспечивает вероятность правильной идентификации не менее 99% при SNR до -5 дБ.

Внедрение

Программные реализации алгоритмов идентификации и оценки параметров сигнала стандарта LTE внедрены в ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца».

Достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью исходных положений и преобразований при составлении математических описаний предложенных методов и подтверждается в частных случаях совпадением результатов имитационного моделирования с ранее известными результатами других авторов. Также достоверность

результатов подтверждается успешной верификацией разработанной модели сигнала стандарта LTE в среде MATLAB/Simulink.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2013 (МАИ, Москва, 2013), Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014 (МАИ, Москва, 2014), V Международная научно-практическая конференция: "Современные концепции научных исследований" (Москва, 2014), 13-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2014» (МАИ, Москва, 2014).

Публикации

Основные результаты исследования опубликованы в 7 работах, в числе которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора

Все результаты, полученные в диссертационной работе, являются личными достижениями автора.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и содержит 117 рисунков, 39 формул, 7 таблиц и 75 позиций списка литературы. Общий объем работы 113 страниц.

Соответствие работы паспорту специальности

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

Основное содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, отмечена её актуальность, практическая ценность, научная новизна и сформулирована цель.

В первой главе приведен обзор публикаций, посвященных методам идентификации и определения параметров цифровых сигналов в целом и для случая сигналов LTE. Глава состоит из двух частей.

В первой части проведен анализ методов идентификации видов модуляции и оценки параметров. По результатам анализа было выявлено, что существующие методы идентификации вида цифровой модуляции можно разделить на два основных класса: методы на основе теории распознавания образов (часто обозначаемые в зарубежной литературе как *pattern recognition*) и методы на основе теории принятия решений (в зарубежной литературе *decision theoretic*).

Для методов первого класса процедуру идентификации можно разделить на два этапа: на первом этапе происходит извлечение признака или набора признаков из принятого сигнала, искаженного шумами и различными эффектами канала связи, на втором этапе полученная оценка признаков сравнивается с теоретическим набором значений опорных признаков, после чего окончательное решение выносится путем выбора ближайшего опорного признака в соответствии с некоторой метрикой. Преимущество такого подхода - это надежность и низкая вычислительная мощность, также методы на основе распознавания образов нечувствительны к отдельным характеристикам сигнала. Поэтому методы распознавания образов в настоящее время широко используются для распознавания модуляции. По данному направлению существует множество публикаций, предлагающих различные признаки для идентификации вида модуляции сигнала, но стоит отметить, методы на основе распознавания образов принято считать субоптимальными. С другой стороны, применение полученных таким образом решений ограничивается конкретным набором систем.

Методы второго класса, основанные на статистической теории принятия решений, также можно разделить на две группы: первые используют для проверки гипотез метод максимального правдоподобия, вторые - минимального расстояния. Такие методы считаются оптимальными, они обеспечивают высокую точность и эффективность, но при этом существенным недостатком становятся высокие требования к вычислительной мощности для случаев большого количества гипотез. Кроме того, метод чувствителен к отклонениям статистической модели от предполагаемой, например при фазовом и частотном сдвиге, замираниях и импульсных помехах.

На основе достоинств и недостатков методов принято решение, что в данной работе наибольший интерес представляют именно методы на основе теории распознавания образов.

В качестве признаков может использоваться корреляция между синфазной и квадратурной компонентами сигнала, дисперсия центрированной нормированной амплитуды, фазы и частоты, дисперсия интервала пересечения нуля (*zero-crossing*), дисперсия величины вейвлет преобразования сигнала после удаления пиков, функция плотности вероятности фазы и

ее статистические моменты, моменты, кумулянты и циклические кумулянты самого сигнала и т.д.

Аналогичные подходы могут применяться и для оценки параметров сигналов. Для случая OFDM систем, как правило, используют методы на основе корреляционных свойств и свойств циклостационарности.

Вторая часть представляет обзор публикаций по идентификации и оценке параметров для сигналов стандарта LTE без использования служебной информации. По данному направлению существует ограниченный круг публикаций следующих авторов: Alyaoui N., Kachouri A., Samet M., Demers F., St-Hilaire M. Выявлено, что данная тема не исследована в полной мере и является актуальной.

Во второй главе рассматривается задача анализа стандарта LTE и разработки имитационной модели сигнала стандарта LTE в среде Matlab/Simulink. Глава состоит из трех частей.

Первая часть посвящена рассмотрению основных особенностей стандарта LTE. Описывается кадровая структура сигнала. Для случая частотного дуплекса каждый кадр состоит из 20 слотов, длительность каждого составляет 0.5 мс, при этом каждый слот в кадре имеет свой порядковый номер от 0 до 19. В стандарте используется понятие подкадра, представляющего собой два соседних слота. В случае частотного дуплекса в каждом интервале в 10 мс используется по 10 подкадров для восходящей и нисходящей передачи данных. Каждый слот состоит из 7 OFDM символов для случая нормального циклического префикса, а для случая расширенного из 6 OFDM символов. При нормальном циклическом префиксе его длительность в первом OFDM символе в слоте больше, чем в 6 последующих. При расширенном циклическом префиксе его длина во всех 6 OFDM символах фиксированная. В первой части раздела также рассматривается понятие ресурсного блока (Resource Block - RB) и ресурсного элемента (Resource Element - RE). Каждый ресурсный блок состоит из 12 расположенных рядом поднесущих и одного временного слота. Ресурсный элемент - это OFDM символ на каждой из поднесущих. Каждый ресурсный элемент характеризуется номером поднесущей и номером символа. При этом часть ресурсных элементов используется для передачи данных от абонентов, а часть задействована под передачу служебной и информации и опорных сигналов. В зависимости от количества используемых ресурсных блоков (6, 15, 25, 50, 75 и 100) сигнал стандарта LTE имеет занимаемую полосу в 1.4, 3, 5, 10, 15 и 20 МГц.

Вторая часть посвящена описанию структуры имитационной модели сигнала стандарта LTE в среде Matlab/Simulink. В этой части приводятся структурные схемы модели с описанием назначения отдельных блоков, а также спектральные характеристики имитационной модели.

Третья часть описывает верификацию имитационной модели. В данной части раздела подтверждается, что разработанная имитационная модель действительно является моделью сигнала стандарта LTE, ввиду полного совпадения спектров сигналов, эюр сигналов в разных точках генератора, а также кадровой структуры сигнала Этот факт позволяет использовать разработанную имитационную модель генератора сигнала стандарта LTE для апробации разработанных методов и алгоритмов идентификации и оценки параметров.

В третьей главе описаны методы идентификации и оценки параметров сигнала стандарта LTE. Глава состоит и 4 частей. Результаты опубликованы в [1,3,4,5,7].

Первая часть посвящена методу определения занимаемой полосы сигнала LTE. В основе рассматриваемого метода лежит вычисление корреляционной кривой по циклическому префиксу для 6 возможных вариантов полос, в дальнейшем задача сводится к анализу полученных результатов. Точность предложенного метода напрямую зависит от метода анализа корреляционных кривых. В работе предлагается разбивать массив значений корреляционной функции на меньшие фрагменты (интервалы) и производить вычисление количества расположенных выше некоторого порогового значения локальных максимумов корреляционной кривой в каждом интервале. Решение о значении занимаемой полосы выносится для канала с наименьшим количеством локальных максимумов.

В качестве формулы для вычисления корреляционной кривой может быть использовано следующее математическое описание (стоит отметить, что эта же операция используется, например, для грубой символьной синхронизации):

$$C[k] = \sum_{n=0}^9 \frac{2 \sum_{r=0}^{r_{\max}} z[k_{\max} n + k + r] z^* [k_{\max} n + k + r + Niff]}{\sum_{r=0}^{r_{\max}} z[k_{\max} n + k + r]^2 + \sum_{r=0}^{r_{\max}} z[k_{\max} n + k + r + Niff]^2}$$

где $n=0, \dots, 9$ - номер учитываемого слота, $r=0, \dots, r_{\max}$ - номер отсчета циклического префикса, k - номер отсчета в слоте, $k=0, \dots, k_{\max}$, $Niff$ - кол-во отсчетов ОБПФ. Значения параметров r_{\max} , k_{\max} , и $Niff$ зависят от полосы сигнала.

В случае, когда параметры r_{\max} , k_{\max} , и $Niff$ выбраны правильно для текущего значения занимаемой полосы сигнала, корреляционная кривая будет иметь 7 или 6 ярко выраженных локальных максимумов для случая нормального или расширенного циклического префикса соответственно, в противном случае кривая имеет шумоподобный вид.

По результатам имитационного моделирования подтверждена эффективность предложенного метода в сравнении с методом измерения полосы сигнала по уровню x дБ, рекомендованному Международным Союзом Электросвязи.

Результаты имитационного моделирования показали, что для моделей каналов с замираниями Extended Pedestrian A (EPA), Extended Vehicular A (EVA) и Extended Typical Urban (ETU) с максимальной частотой Доплера 5, 70 и 300 Гц, соответственно, предложенный метод превосходит по точности рекомендованный Международным Союзом Электросвязи метод оценки по уровню x дБ, а также методы на основе вейвлет преобразования. Предложенный метод является устойчивым к влиянию замираний и позволяет обеспечить высокую долю правильных измерений полосы сигнала даже при низких ОСШ. Так при полосе сигнала LTE в 20 МГц для модели канала EPA при диапазоне ОСШ от -3 до 30 дБ доля правильных измерений полосы составляет не менее 0.9, а для моделей каналов EVA и ETU при диапазоне ОСШ от -3 до 30 дБ не менее 0.99 (при диапазоне ОСШ от -6 до 30 дБ не менее 0.9). Дальнейшее увеличение точности рассматриваемого метода в области низких значений ОСШ возможно за счет увеличения усредняемого объема слотов, а также за счет более сложных алгоритмов анализа полученных корреляционных функций. Фрагмент результатов моделирования представлен на рисунке 1, моделирование проводилось без использования эквалайзера.

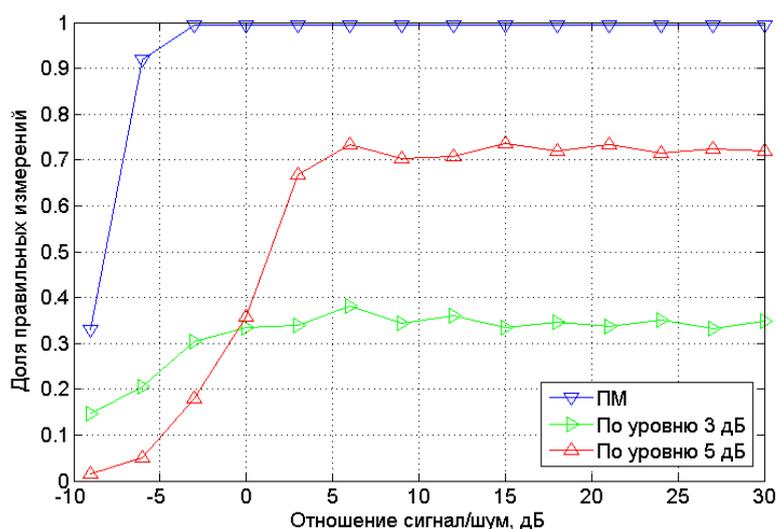


Рисунок 1 - Зависимость вероятности верного определения полосы от ОСШ для полосы 20 МГц, модель канала Extended Typical Urban.

Вторая часть освещает вопрос идентификации сигнала стандарта LTE. В данной работе разработан комплексный метод, основанный на поэтапном определении параметров принимаемого сигнала. На первом этапе предлагается вычисление значения занимаемой полосы сигнала по методу, описанному в первой части третьей главы. В случае если полученное

значение оценки совпадает с вектором значений полосы сигнала, характерных для стандарта, начинается выполнение второго этапа.

На втором этапе предлагается вычисление длительности информационного символа на поднесущих сигнала с использованием заимствованного подхода, используемого, например, при определении длительности информационного символа на основе вейвлет преобразования. В данной части исследована применимость рассматриваемого метода для сигнала стандарта LTE. В случае выявления на обоих этапах значений, характерных именно для стандарта LTE выносится решение о том, что принимаемый сигнал - это сигнал стандарта LTE.

Результаты имитационного моделирования показали, что в случае с OFDM сигналом, точность исследуемого метода определения длительности информационного символа при диапазоне значений отношения сигнал/шум от -10 до 30 дБ обусловлена количеством усредняемых результатов. При достаточном усреднении метод позволяет обеспечить точность оценки не менее 99% в указанном диапазоне отношений сигнал/шум (рисунок 2). На рисунке 2 M - это объем усреднения результатов.

Т.о. точность метода идентификации обусловлена точностью метода определения занимаемой полосы сигнала. При полосе сигнала LTE в 20 МГц для модели канала EPA при диапазоне ОСШ от -3 до 30 дБ доля правильных измерений полосы составляет не менее 0.9, а для моделей каналов EVA и ETU при диапазоне ОСШ от -3 до 30 дБ не менее 0.99 (при диапазоне ОСШ от -6 до 30 дБ не менее 0.9).

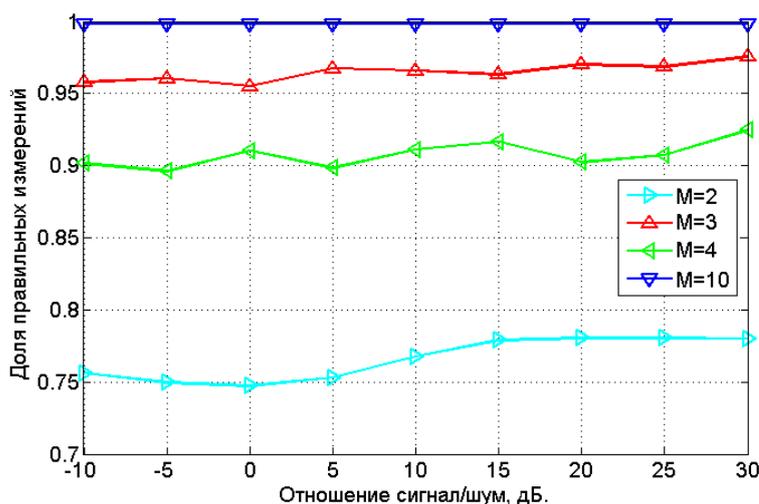


Рисунок 2 - Зависимость доли правильных измерений длительности символа от ОСШ для полосы 20 МГц, модель канала Extended Typical Urban.

Третья часть посвящена вопросу детектирования последовательностей Задова-Чу, используемых в стандарте LTE в качестве первичного и вторичного синхросигнала в нисходящем направлении. Точное детектирование первичного и вторичного синхросигнала

обеспечивает кадровую синхронизацию, а также позволяет вычислить целую часть частотной отстройки. В данной части предлагается метод вычисления корреляционной функции для последовательностей Задова-Чу, позволяющий снизить вероятность возникновения ложного максимума, обусловленного шумами и другими канальными эффектами.

Первичный синхросигнал формируется в соответствии с ниже представленным математическим описанием:

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{-\frac{\pi u n(n+1)}{63}} & n = 0, 1, \dots, 30 \\ e^{\frac{\pi u (n+1)(n+2)}{63}} & n = 31, 32, \dots, 61 \end{cases}$$

где u - индекс, принимающий значение 25, 29 или 34 в зависимости от второй составляющей идентификатора соты $N_{ID}^{(2)}$.

В основе предложенного метода лежит следующее свойство: быстрое преобразование Фурье (БПФ) (Fast Fourier Transform (FFT)) от последовательности Задова-Чу – это тоже последовательность Задова-Чу. Эта особенность характерна для всех последовательностей Задова-Чу в целом, и не связана с конкретными значениями индекса u .

В случае наличия шума в канале, принимаемый сигнал можно записать как:

$$S(n) = d_u(n) + N(n)$$

где $N(n)$ – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ).

Взаимная корреляция принятой смеси сигнала с шумом и образца синхросигнала находится как:

$$Corr_1(m) = \sum_{n=0}^{61} d_u^*(n) S(n+m)$$

Также вычисляется взаимнокорреляционная функция на основе результатов БПФ:

$$Corr_2(m) = \sum_{n=0}^{61} |FFT_S(n)| |FFT_{d_u}(n+m)|$$

Результатом является перемножение двух полученных взаимнокорреляционных функций:

$$R(m) = |Corr_1(m) Corr_2(m)|$$

Результаты имитационного моделирования подтвердили эффективность метода в сравнении с классическим, основанным на вычислении корреляционной функции $Corr_1(m)$ принимаемого синхросигнала с его образцом. Выявлено, что при идеальной работе системы синхронизации для значения вероятности ложного определения максимума

взаимнокорреляционной функции $P_g = 10^{-5}$ для модели канала ERA энергетический выигрыш составил 1.9 дБ, для модели канала EVA 1.7 дБ, для модели канала ETU 1.5 дБ. При наличии нормированной частотной отстройки до $f / \Delta f \approx 0.35$ предлагаемый метод позволяет получить значение вероятности P_g , которое при использовании классического метода достигается лишь при полном отсутствии нормированной частотной отстройки. Нормировка произведена к величине разноса между поднесущими $\Delta f = 15$ кГц. При дальнейшем увеличении нормированной частотной отстройки значение энергетического выигрыша в сравнении с классическим методом увеличивается. Фрагмент результатов моделирования представлен на рисунке 3.

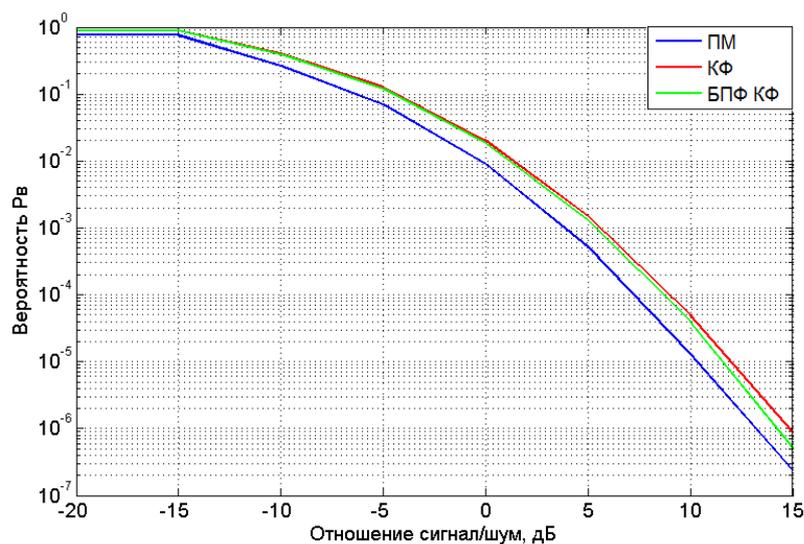


Рисунок 3 - Зависимость вероятности ложного определения максимума взаимнокорреляционной функции (P_g) от ОСШ для модели канала Extended Vehicular A.

Четвертая часть посвящена определению направления передачи: нисходящее или восходящее. В стандарте LTE в нисходящем направлении для осуществления процедуры синхронизации используется первичный и вторичный синхросигнал, на этой особенности базируется предлагаемый подход. Предлагается осуществление процедуры детектирования первичного синхросигнала, в случае успешного результата выносится решение о нисходящем направлении передачи, в противном случае - о восходящем.

В основе подхода, используемого в стандарте для синхронизации, лежит вычисление корреляционных функций для трех образцов первичного синхросигнала, заранее известных на приемной стороне с фрагментами принимаемого сигнала, попадающими в интервал окна наблюдения.

Далее анализируется максимальное значение корреляционных функций в каждом из каналов обработки и выносится решение о том, какой из трех первичных синхросигналов был принят. Однако, в случае если заранее неизвестно, является ли принимаемый сигнал нисходящего направления, то описанный алгоритм будет ошибочно выдать сведения о первичном синхросигнале. В связи с этим была предложена модификация этого метода.

В случае попадания первичного синхросигнала в окно наблюдения, в одном из каналов обработки будет зафиксировано значение максимума корреляционной функции, превышающее значения в других каналах. Было исследовано, что за счет хороших автокорреляционных свойств первичного синхросигнала, представляющего последовательность Задова-Чу, даже при отрицательных значениях отношения сигнал/шум соотношение значения максимума корреляционной функции в канале, где произошло совпадение принятого синхросигнала с образцом, к значениям в двух других каналах имеет значение не ниже 1.5. Эта особенность может применяться для детектирования первичного синхросигнала, а как следствие и нисходящего направления передачи. В случае если принимаемый сигнал восходящего направления, то значение соотношений максимумов в каждом из каналов обработки имеет значение не более 1.2.

В четвертой главе рассматривается вопрос распознавания структуры сигналов на поднесущих сигнала стандарта LTE. Глава состоит из двух частей. Результаты опубликованы в [2,6].

Первая часть посвящена задаче идентификации вида модуляции на поднесущих сигнала стандарта LTE. В данной части апробирован заимствованный метод идентификации на основе следующего математического описания:

$$Param = \frac{mean | DFT(\frac{|S(n)|}{m_a} - 1) |^2}{N_s}$$

где DFT – дискретное преобразование Фурье, $S(n)$ - принимаемый сигнал, m_a - математическое ожидание принимаемого сигнала, N_s - количество анализируемых отсчетов в кадре, $mean$ - операция усреднения. Такой метод позволял идентифицировать фазовую модуляцию только как класс, и не позволял различить модуляцию ФМ-4 и ФМ-2 (ФМ-2 применяется в стандарте для передачи служебной информации) (рисунок 4).

На основе данного метода была предложена его модификация, в соответствии с которой предлагается перед вычислением ключевого параметра произвести с сигналом следующую операцию:

$$S'(n) = FFT(S1(n)IFFT(S(n)))$$

где FFT – быстрое преобразование Фурье, $IFFT$ – обратное преобразования Фурье и $S1(n)$ – сигнал с постоянной единичной амплитудой и с линейно нарастающей на всей длительности фазой от $-\pi$ до π .

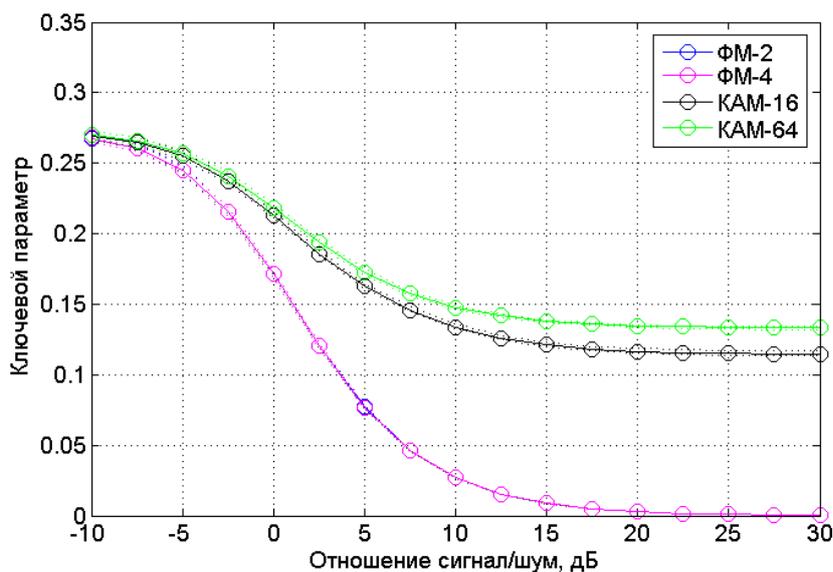


Рисунок 4 - Зависимость ключевого параметра от отношения сигнал/шум для априорируемого метода.

В результате такого преобразования сигналы с модуляцией ФМ-2 становятся различимыми с вероятностью не менее 99% при ОСШ от -5 до 30 дБ, а ФМ -4 с вероятностью 99% при ОСШ до 0 дБ. (рисунок 5).

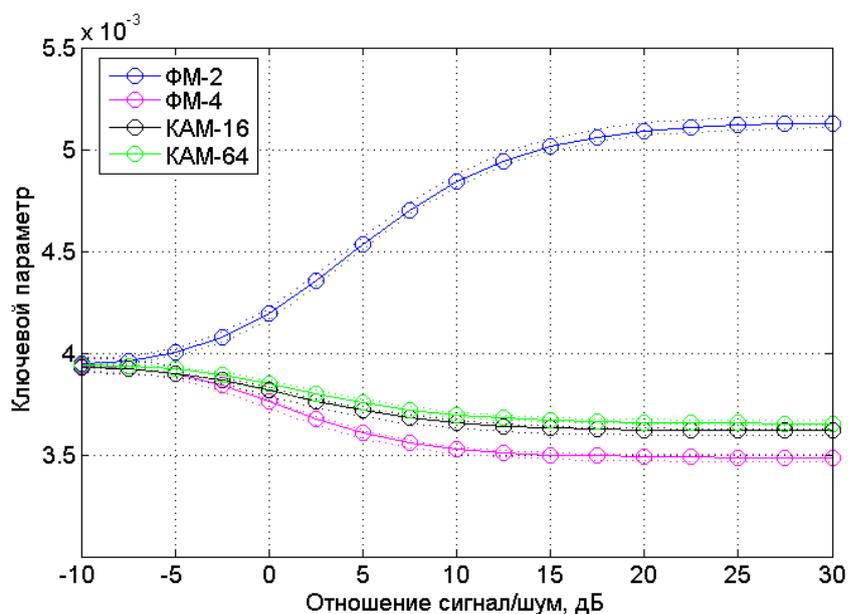


Рисунок 5 - Зависимость ключевого параметра от отношения сигнал/шум для модифицированного метода.

Вторая часть посвящена задаче измерения текущего отношения сигнал/шум без использования опорных сигналов. В стандарте LTE, как и в OFDM системах в целом, применяется защитный интервал, называемый циклическим префиксом для борьбы с межсимвольной интерференцией. Это означает разделение длительности символа на полезную часть и циклический префикс, формирующийся путем дублирования определенного количества отсчетов с конца символа в его начало. Это свойство и лежит в основе предлагаемого метода.

На вход системы поступает смесь сигнала с шумом:

$$z(t) = S_{OFDM}(t) + n(t)$$

где $S_{OFDM}(t)$ - переданный сигнал, $n(t)$ - аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ).

Далее осуществляется последовательно-параллельное преобразование, после которого сигнал имеет структуру фрейма из N - отсчетов, где N - количество отсчетов, содержащихся в одном OFDM символе. Из накопленной последовательности выбираются отсчеты, соответствующие циклическому префиксу и отсчеты с конца OFDM символа, из которых циклический префикс был сформирован. Отметим, работа метода предусматривает идеальную работу системы символьной синхронизации.

Обозначим принятый искаженный каналом циклический префикс как $S_1(t)$, а принятый фрагмент сигнала с конца OFDM символа $S_2(t)$. С учетом шума в канале искаженный циклический префикс можно записать как

$$S_1(t) = S_{cp}(t) + n_1(t)$$

где $S_{cp}(t)$ – незашумленный циклический префикс, а ввиду полной идентичности, это и фрагмент сигнала с конца OFDM символа. Т.е.

$$S_2(t) = S_{cp}(t) + n_2(t)$$

Вычисляя авто- и взаимнокорреляционные функции, при достаточном количестве усредняемых значений получим:

$$R_{S_1S_1mean}(0) = \frac{\sum_{i=1}^M R_{S_1S_1i}}{M} \approx \int S_{cp}(t)S_{cp}^*(t)dt + \int n_1(t)n_1^*(t)dt \approx P_s + P_n$$

$$R_{S_1S_2mean}(0) = \frac{\sum_{i=1}^M R_{S_1S_2i}}{M} \approx \int S_{cp}(t)S_{cp}^*(t)dt \approx P_s$$

где M - объем усредняемой выборки значений КФ и АКФ.

Далее значение отношения сигнал/шум в полосе сигнала можно найти как:

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{R_{S1S2mean}(0)}{R_{S1S1mean}(0) - R_{S1S2mean}(0)} \right)$$

Однако такой метод имеет низкую точность оценки SNR. В связи с этим была предложена другая методика. В качестве ключевого параметра, по которому будет определяться SNR, была выбрана мощность шума P_{noise} , определяемая как:

$$P_{noise} = \lg(R_{S1S1mean}(0) - R_{S1S2mean}(0))$$

После чего ключевой параметр пересчитывается в текущее значение отношения сигнал/шум.

Результаты проведенного имитационного моделирования показали, что на интервале от -5 до 30 дБ предложенный метод обеспечивает систематическую ошибку оценки значения отношения сигнал/шум менее 0.004 дБ при вычислении отношения сигнал/шум по 100 слотам ($M=100$) длительностью 50 мс. Зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) оценки значения сигнал/шум представлена на рисунке 6. На интервале от -5 до 30 дБ предложенный метод обеспечивает СКО оценки значения отношения сигнал/шум менее 0.11 дБ, а на интервале от 5 до 30 дБ менее 0.07 дБ при $M=100$.

В данной части раздела также проведено исследование влияния ошибок символьной синхронизации на точность предложенного метода. Исследование проводилось для случая расширенного префикса, выявлено, что ошибка синхронизации даже на 1 отсчет приводит к существенному ухудшению точности метода, однако при увеличении полосы сигнала, засчет увеличения и длины префикса, влияние уменьшается.

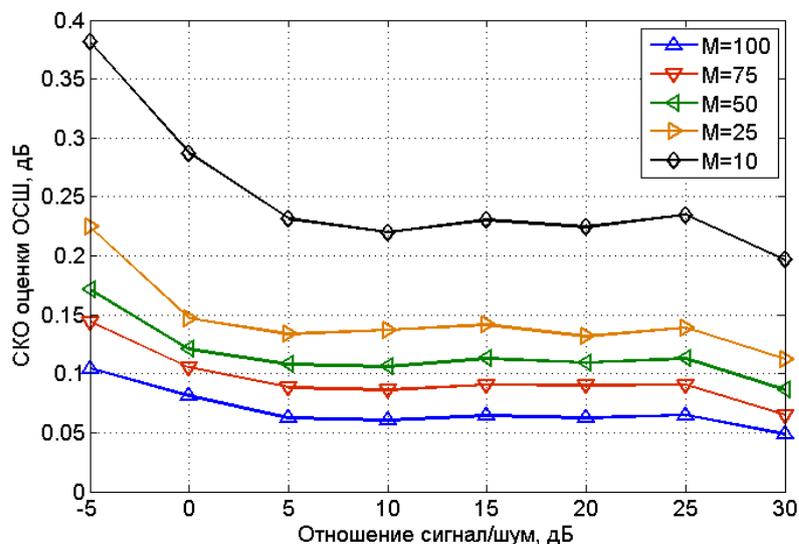


Рисунок 6 - Зависимость СКО оценки отношения сигнал/шум от текущего отношения сигнал/шум.

В пятой главе описывается программно-алгоритмический комплекс, разработанный в среде MATLAB/Simulink с применением описанных в предыдущих главах методов. Программно-алгоритмический комплекс позволяет произвести идентификацию сигнала стандарта LTE, оценку полосы сигнала, направления передачи, длины циклического префикса, длительности информационного символа на поднесущих, выполнить символьную и кадровую синхронизацию, компенсировать частотную отстройку, демодулировать принятый OFDM/SC-OFDM сигнал, оценить отношение сигнал/шум, а также идентифицировать вид модуляции на поднесущих в слепую без использования служебной информации.

Модель программно-алгоритмического комплекса и её графический интерфейс представлены на рисунках 7-8. Также в главе проведен анализ работоспособности разработанного программно-алгоритмического комплекса, выявлена высокая эффективность идентификации и оценки даже при низких значениях отношения сигнал/шум.

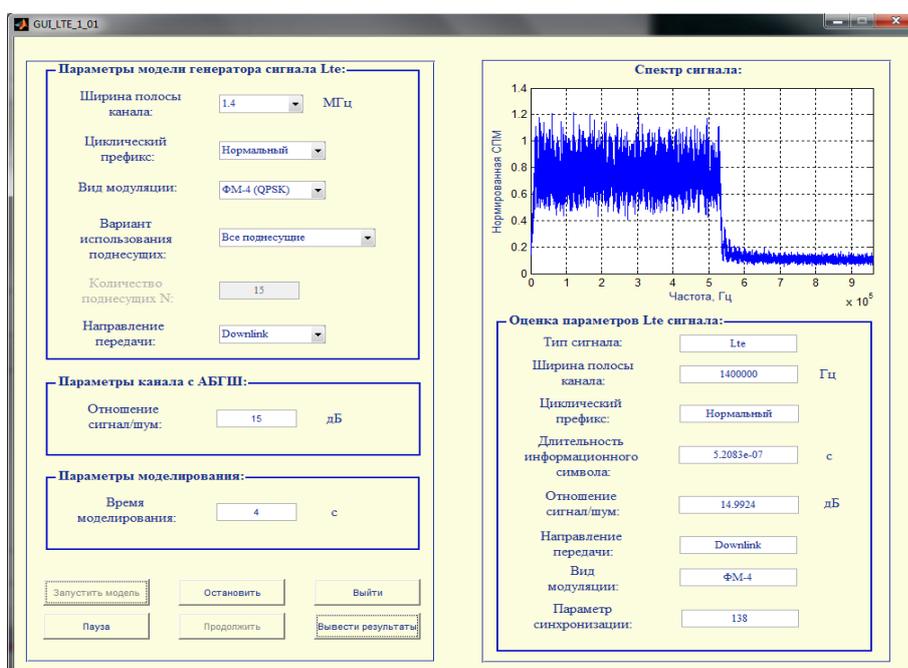


Рисунок 7 - Графический интерфейс разработанного программно-алгоритмического комплекса.

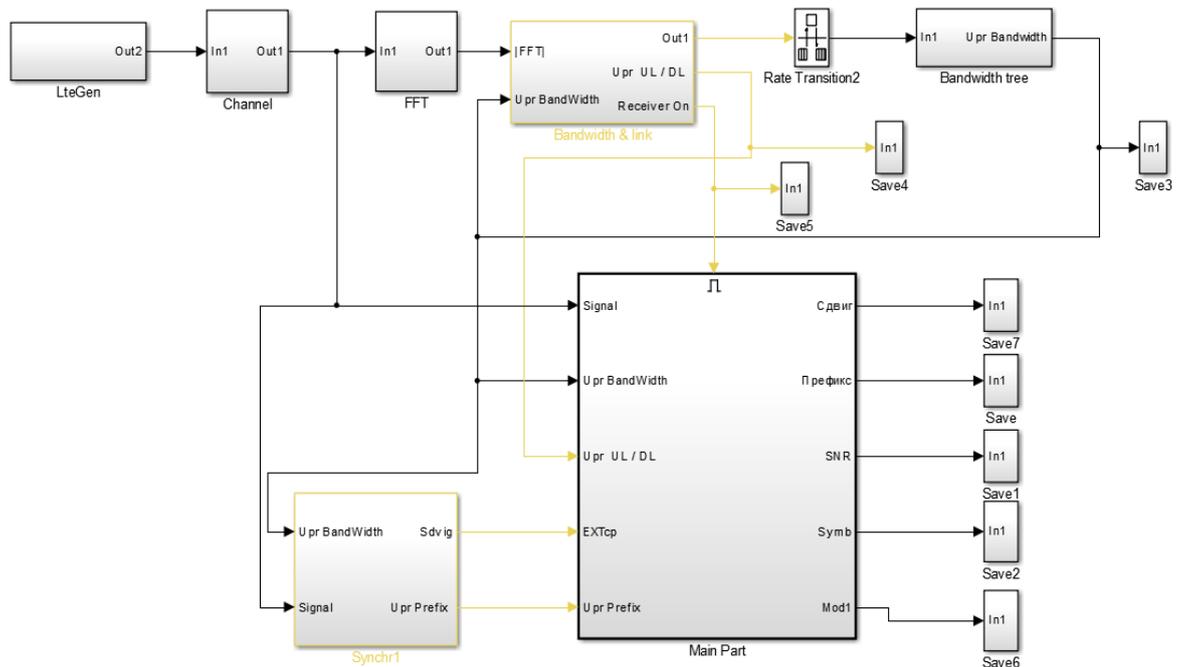


Рисунок 8 - Программно-алгоритмический комплекс по идентификации и оценке параметров сигнала стандарта LTE в среде MATLAB/Simulink.

Основные результаты и выводы по работе

1. Проанализированы основополагающие работы по идентификации цифровых методов модуляции. Выявлены основные классы методов идентификации: методы на основе статистической теории распознавания образов и методы на основе статистической теории принятия решений, а также их отличительные особенности. Установлено, что для решения поставленной в работе задачи наибольший интерес представляют методы на основе статистической теории распознавания образов.

2. Проанализированы основополагающие работы по оценке параметров сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием. Выявлены основные методы, используемые для решения подобного рода задач.

3. Проанализированы работы по идентификации и оценке параметров сигнала стандарта LTE. Выявлено, что задача автоматической идентификации LTE сигнала и определения его параметров в полной мере не решена. Обоснована необходимость разработки методов и алгоритмов для решения задачи идентификации и оценки.

4. Проанализированы основные особенности стандарта LTE. Изучен физический уровень стандарта LTE: рассмотрены технологии OFDM и SC-OFDM, возможные конфигурации с точки зрения занимаемой полосы сигнала, изучена структура кадров для случая частотного и временного дуплекса, структура слотов, принцип формирования циклического префикса,

изучены основные физические каналы для нисходящего и восходящего направления, каналы управления, сигналы синхронизации и т.д.

5. Разработана имитационная модель физического уровня стандарта LTE в среде MATLAB/Simulink, приведены структурные схемы с описанием назначения блоков, а также описание возможностей модели.

6. Проведена успешная верификация модели. Установлено, что разработанная модель действительно является моделью стандарта LTE в виду полного совпадения характеристик (значения поддерживаемых полос сигнала, форма спектра, поддержка OFDM для нисходящего и SC-OFDM восходящего направления, длительности OFDM символов и символов на поднесущих, длительностей нормального и расширенного циклического префикса и т.д.).

7. Предложен метод определения полосы сигнала стандарта LTE по корреляционной кривой циклического префикса и проведен анализ доли правильных измерений полосы сигнала для каналов с замираниями. Результаты имитационного моделирования показали, что для моделей каналов с замираниями EPA, EVA и ETU с максимальной частотой Доплера 5, 70 и 300 Гц, соответственно, предложенный метод превосходит по точности рекомендованный Международным союзом электросвязи метод оценки по уровню x дБ, а так методы на основе вейвлет преобразования. Предложенный метод является устойчивым к влиянию замираний и позволяет обеспечить высокую долю правильных измерений полосы сигнала даже при низких ОСШ.

8. Разработан алгоритм автоматического распознавания LTE сигнала. Метод обеспечивает вероятность правильной идентификации не менее 85% при отношении сигнал/шум от -5 до 30 дБ на фоне АБГШ и замираний.

9. Предложен метод вычисления корреляционной функции для последовательностей Задова-Чу. Метод обеспечивает более высокую точность вычисления максимума корреляционной функции при наличии шума в канале и частотной отстройке в сравнении с классическим методом.

11. Разработан метод идентификации направления передачи сигнала LTE, показывающий высокую точность даже при низких значениях ОСШ.

12. Модифицирован метод идентификации вида модуляции на поднесущих для сигнала стандарта LTE. Метод позволяет идентифицировать ФМ-2 модуляцию с вероятностью не менее 99 % при ОСШ до -5 дБ, а ФМ-4 с вероятностью 99% при ОСШ до 0 дБ..

13. Предложен алгоритм определения отношения сигнал/шум в полосе сигнала по циклическому префиксу, обеспечивающий СКО оценки не более 0.11 дБ в диапазоне значений отношения сигнал/шум от -5 до 30 дБ.

14. Исследовано влияние ошибок символьной синхронизации на точность разработанного метода определения отношения сигнал/шум в полосе сигнала по циклическому префиксу.

15. Разработан программно-алгоритмический комплекс по идентификации и оценке параметров сигнала стандарта LTE. Программно-алгоритмический комплекс позволяет произвести идентификацию сигнала стандарта LTE, оценку полосы сигнала, направления передачи, длины циклического префикса, длительности информационного символа на поднесущих, выполнить символьную и кадровую синхронизацию, компенсировать частотную отстройку, демодулировать принятый OFDM/SC-OFDM сигнал, оценить отношение сигнал/шум, а также идентифицировать вид модуляции на поднесущих без использования служебной информации.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Казачков В.О. Исследование реализации синхронизации по сигналам Задова-Чу в стандарте LTE для канала с замираниями // Интернет-журнал «Науковедение», №1 (26) 2015. <http://naukovedenie.ru/PDF/39TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

2. Казачков В.О. с // Интернет-журнал «Науковедение», №1 (26) 2015. <http://naukovedenie.ru/PDF/40TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

3. Казачков В.О. Исследование метода определения полосы сигналов стандарта Long Term Evolution по циклическому префиксу в каналах с замираниями // Интернет-журнал «Науковедение», №6 (25) 2014. <http://naukovedenie.ru/PDF/200TVN614.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Публикации в других изданиях и сборниках докладов конференций

4. Казачков В.О. Реализация синхронизации с использованием сигналов Задова-Чу в стандарте LTE. // V Международная научно-практическая конференция «Современные концепции научных исследований» 29-30 августа 2014 года, Москва. Сборник научных работ. Часть 3. С.58-61.

5. Казачков В.О. Модель временной синхронизации LTE сигналов по циклическому префиксу в среде MATLAB/Simulink, Сборник тезисов докладов Московской молодежной

научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2013», изд. ООО «Принт-салон», Санкт - Петербург: - 2013 г., стр. 231-232.

6. Казачков В.О. Исследование влияния ошибок символьной синхронизации на точность методов определения текущего отношения сигнал/шум по циклическому префиксу в OFDM системах , Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2014», изд. ООО «Принт-салон», Санкт - Петербург: - 2014 г., стр. 157-158.

7. Казачков В.О. Метод оценки полосы сигнала стандарта LTE по корреляционной кривой циклического префикса. // 13 Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2014» 17-21 ноября 2014, Москва. Тезисы. – СПб.: Мастерская печати, 2014. С. 390-392.