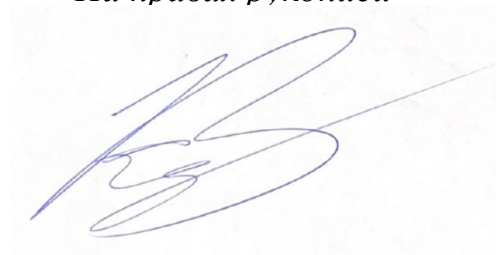


На правах рукописи



Купцов Виталий Владимирович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕСТАЦИОНАРНЫХ КАНАЛОВ МОБИЛЬНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ
В СИСТЕМАХ СОТОВОЙ СВЯЗИ 5-ГО ПОКОЛЕНИЯ**

1.3.4 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

Мальцев Александр Александрович
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Чернояров Олег Вячеславович
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры электроники
и наноэлектроники Национального
исследовательского университета «МЭИ»

Родионов Александр Алексеевич
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией обработки
многомерных сигналов Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии
наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное учреждение высшего
образования «Воронежский
государственный университет»

Защита состоится «28» сентября 2022г. в 15:00 на заседании диссертационно-
го совета 24.2.340.03 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.
Лобачевского по адресу: Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Ниже-
городского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте Ни-
жегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу
<https://diss.unn.ru/1224>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., доцент



Клюев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время происходит стремительное развитие систем беспроводной связи и беспроводных технологий. Высокие требования к скорости передачи данных в таких системах диктуют необходимость внедрения алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающих высокое качество связи и достижение максимально возможной пропускной способности.

Для выполнения данных задач в современных системах связи широко используются многоэлементные антенные решетки с технологией massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) [1-11], которые позволяют за счет оптимального формирования диаграмм направленности осуществить параллельную передачу данных по нескольким пространственным каналам одновременно и тем самым существенно повысить общую пропускную способность системы связи. Помимо этого, наличие большого числа антенных элементов позволяет лучшим образом подстраивать диаграмму направленности в условиях многолучевого распространения радиосигнала, характерного для городских типов застройки, за счет большего количества степеней свободы. Использование многоэлементных антенн позволяет также более эффективно с точки зрения общей пропускной способности системы осуществлять планирование и распределение частотно-временных ресурсов, доступных в системе связи.

Однако для эффективного формирования диаграмм направленности многоэлементных антенн необходимо иметь достоверную информацию о канальной матрице (импульсных или частотных характеристиках на каждом из антенных элементов). Необходимость высокоэффективной оценки характеристик канала особенно остро проявляется для пользователей с высокой мобильностью в современных системах связи 5-го поколения. В связи с быстрым перемещением пользователей оценка канала быстро устаревает, что в свою очередь ведет к существенной деградации качества связи и уменьшению скорости передачи данных в системе [12-21]. Поэтому задача создания новых методов и алгоритмов оценивания характеристик канала мобильных пользователей в современных системах сотовой связи в настоящее время становится особенно актуальной.

Настоящая диссертационная работа посвящена созданию новых методов и алгоритмов оценивания характеристик канала мобильных пользователей в современных LTE (Long Term Evolution) [22, 23] и 5G NR (5-th Generation New Radio) [24] системах сотовой связи, использующих многоэлементные антенные решетки с цифровым и цифро-аналоговым формированием диаграммы направленности. Важность выбранной темы диссертации подтверждается не только большим объемом публикаций в научно-технических изданиях, посвященных этому вопросу, но также активной работой проводимой в данном направлении во всех ведущих компаниях-производителях коммуникационного оборудования (Huawei, Samsung, Apple, Intel, LG, Ericson, Nokia и др.).

Степень разработанности темы диссертационной работы

Наиболее эффективным образом управление диаграммой направленности многоэлементной антенной системы осуществляется путем использования цифровых антенных решёток. При реализации цифровой схемы управления диаграммой направленности антенной решётки сигнал, излучаемый каждым антенным элементом, формируется независимо в цифровом виде путём умножения передаваемого сигнала на соответствующий элемент цифрового диаграммообразующего вектора. Аналогично при осуществлении приёма, сигналы с каждого антенного элемента оцифровываются независимо, умножаются на элементы диаграммообразующего вектора и суммируются. Таким образом, число применяемых в системе аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП, ЦАП) при таком подходе равняется числу элементов антенной решётки, которое в современных ММО системах связи достигает нескольких сотен.

Цифровая схема управления антенной решёткой отличается высокой гибкостью при настройке диаграммы направленности, так как позволяет задавать произвольные амплитудно-фазовые соотношения между элементами в цифровом виде с точностью ограниченной лишь разрядностью АЦП/ЦАП. Однако реализация подобной схемы, особенно в случае многоэлементных антенных решеток, требует существенных аппаратных и вычислительных ресурсов, что существенно увеличивает конечную стоимость системы и уровень энергопотребления. Аппаратные затраты вызваны тем, что на каждый элемент антенной решетки необходим отдельный радиочастотный (РЧ) тракт с АЦП/ЦАП. Также следует отметить, что для функционирования данной системы необходимо проводить оценку канала между всеми элементами передающих и приемных антенн, а данная процедура требует значительных дополнительных частотно-временных ресурсов, что очевидно снижает производительность системы связи.

Обеспечить высокую гибкость системы при меньших аппаратных, вычислительных и денежных затратах, можно путём создания комбинированной цифро-аналоговой (гибридной) схемы управления диаграммой направленности [25-27]. Гибридная схема управления включает в себя последовательное применение к передаваемому/принимаемому сигналу диаграммообразующих векторов в цифровой и аналоговой областях. При этом число аналоговых фазовращателей больше либо равно числу элементов антенной решётки, а количество АЦП/ЦАП значительно меньше. В связи с явными преимуществами комбинированной схемы управления диаграммой направленности, она получает всё большее распространение в современных системах связи [28-31].

Для систем связи с гибридной цифро-аналоговой схемой управления диаграммой направленности задача формирования диаграммообразующего вектора разбивается на две подзадачи: выбор аналоговых весовых коэффициентов и выбор цифровых весовых коэффициентов. Существует ряд известных алгоритмов выбора цифровых и аналоговых весовых коэффициентов [32-35]. При этом выбор оптимального комбинированного диаграммообразующего вектора теоретически возможен, только если известны каналные коэффициенты для всех элементов антенных решёток приемника и передатчика. В работе [32] предложен метод последовательной аппроксимации на основе совместного применения к аналоговой и цифровой частям антенной решетки критерия, минимизирующего потери информации на каждом этапе. В работе [36] предложен алгоритм восстановления канала, осно-

ванный на двухмерной пространственной интерполяции. Иной подход исследован в [34]. Этот подход базируется на представлении канальной матрицы в некотором базисе диаграммообразующих векторов (кодовой книги), отбор которых осуществляет пользователь. Данный метод требует дополнительной загрузки служебного канала обратной связи от приемника к передатчику для осуществления процедуры отбора векторов кодовой книги.

В связи с вышеизложенным особенно актуальной становится задача разработки эффективных универсальных алгоритмов оценивания полной канальной матрицы для систем связи, использующих гибридные антенные решетки, которые могли бы быть использованы в различных современных стандартах беспроводной связи и не требовали дополнительных частотных и временных ресурсов.

Другим важным аспектом работы систем связи LTE и 5G NR в городских условиях является эффективное обслуживание высококомобильных пользователей. К числу таковых относятся пользователи, передвигающиеся на различных транспортных средствах: велосипедах, автомобилях, наземном общественном транспорте. Характерный для них диапазон скоростей составляет 10 – 60 км/ч.

Качество обслуживания таких абонентов в системе значительно зависит от точности и актуальности информации о характеристиках нисходящего канала связи между базовой станцией и пользователем. Оценка данных характеристик при работе системы связи в режиме временного разделения восходящего и нисходящего каналов TDD (Time Division Duplex) производится на основе пилотных сигналов SRS (Sounding Reference Signal), периодически передаваемых пользовательским устройством по восходящему каналу связи [22, 23, 37]. Период пилотных сигналов определяется структурой кадра TDD и не может быть меньше 5 мс [22, 23, 37]. Информация о характеристиках канала устаревает на интервале между двумя последовательными SRS тем быстрее, чем выше скорость пользователей. И как следствие, данный процесс оказывает существенное влияние на качество связи высококомобильных пользователей. Различие между актуальной информацией о канале и информацией, оценённой на основе SRS, особенно критично для MU-MIMO (Multi User – Multiple Input Multiple Output) [38, 39] режима работы системы связи, когда передача данных нескольким пользователям осуществляется одновременно в рамках одного или нескольких общих частотно-временных ресурсных блоков PRB (Physical Resource Block). Поскольку в режиме MU-MIMO подобное различие приводит к неточному формированию базовой станцией диаграммообразующих векторов, ошибкам при выборе схем модуляции и кодирования MCS (Modulation and Coding Scheme), неэффективной группировке пользователей для пространственного разделения, уменьшению усиления антенны при передаче данных и, что особенно важно, к увеличению межпользовательской интерференции. Всё это в конечном итоге приводит к существенному уменьшению производительности системы связи и общей скорости передачи данных [20].

Одним из способов решения описанной проблемы является применение для оценки характеристик быстро меняющихся каналов алгоритмов предсказания, которые используются в области цифровой обработки сигналов.

Примем за единицу времени (целый шаг) интервал между двумя последовательными SRS сигналами, когда значение канальных коэффициентов может быть измерено непосредственно [22, 40]. Известен ряд работ, посвященных исследованию различных алгоритмов предсказания характеристик канала. Так, например, в [14] описан алгоритм предсказания на основе фильтра Винера, в [16] проведен

сравнительный анализ нескольких методов предсказания, в том числе на основе фильтра Калмана. Однако предсказание в данных работах осуществляется на целый шаг. В то же время очевидно, что наиболее эффективным было бы предсказание канала на момент передачи данных от базовой станции к пользователю, то есть в произвольный момент времени между SRS сигналами. В рамках классической задачи это требует прогнозирования значений случайной последовательности на дробный шаг.

Очевидно, что традиционные хорошо известные методы предсказания случайных последовательностей на целое число шагов в данном случае не применимы. Задача предсказания на дробный шаг не является тривиальной и требует сочетания техник предсказания и интерполяции. В известной работе [41] рассмотрен алгоритм линейного предсказания, основанный на автокорреляционных свойствах сигнала и интерполяционной формуле Уиттекера – Шеннона. Данный подход является оптимальным при условии стационарности случайного процесса, описывающего изменения канальных коэффициентов во времени. Однако реализация данного алгоритма на практике требует существенных аппаратных затрат и длительного времени наблюдения для точной оценки корреляционных характеристик канала связи. При этом условие на стационарность канальных коэффициентов не всегда выполняется.

Основываясь на вышесказанном, можно заключить, что в настоящее время особенно актуальной является задача разработки и создания эффективных практических алгоритмов предсказания канальных коэффициентов элементов антенных решеток для произвольного момента времени, которые могли бы быть применимы в современных системах связи нового поколения.

С целью преодоления возникающих при реализации корреляционного подхода трудностей и нахождения более точного решения задачи предсказания канала с учетом специфики многолучевого распространения сигналов в настоящей работе было предложено использовать параметрические алгоритмы предсказания канальных коэффициентов. Данные алгоритмы основаны на представлении модели изменений канальных коэффициентов в виде суперпозиции гармонических составляющих, связанных с различными путями распространения сигналов, и использовании сверхразрешающих методов спектрального анализа для оценки параметров предложенной модели.

Цель диссертационной работы

Целью работы является разработка методов восстановления канала в системах связи, использующих многоэлементные гибридные антенные решетки, создание новых методов и алгоритмов оценивания нестационарных каналов мобильных пользователей в системах сотовой связи 5-го поколения на основе более реалистичных параметрических моделей для повышения пропускной способности и качества связи.

Задачи диссертационной работы

1. Разработка эффективного метода восстановления канала для систем связи, использующих многоэлементные гибридные антенные решетки.

2. Разработка параметрической модели изменений канальных коэффициентов и алгоритмов предсказания их значений с учетом специфики многолучевого распространения сигналов.

3. Применение спектральных методов сверхразрешения для более точного оценивания параметров модели изменений канальных коэффициентов.

4. Сравнительный анализ и оценка эффективности применения корреляционных и параметрических алгоритмов предсказания канальных коэффициентов для повышения пропускной способности систем мобильной связи 5-го поколения.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, теории информации, высшей алгебры, векторного анализа и теории матриц, а также методы математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработан итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы в системах связи с гибридными многоэлементными антенными решетками на основе пилотных сигналов, передаваемых пользователем по восходящему каналу связи. Данный алгоритм является универсальным с точки зрения различных стандартов и не требует дополнительных частотных и временных ресурсов.

2. На основе применения алгоритмов предсказания предложен метод, позволяющий увеличить точность восстановления полной канальной матрицы в условиях динамического нестационарного канала на момент передачи данных. Проведен анализ эффективности работы предложенного алгоритма восстановления для различных взаимных скоростей движения приёмника и передатчика.

3. Разработан параметрический алгоритм предсказания канала высокоомобильных пользователей систем связи 5-го поколения на дробный шаг, основанный на параметрической модели, в фундаменте которой лежит полигармоническое представление зависимости канальных коэффициентов от времени, и применении алгоритмов сверхразрешения для оценки параметров данной модели. Проведено сравнение эффективности разработанного алгоритма с известным алгоритмом предсказания на базе автокорреляционного подхода.

4. Адаптирован и применен сверхразрешающий корневой метод минимального многочлена для оценки параметров модели канальных коэффициентов, используемой в разработанном алгоритме предсказания. Проведен сравнительный анализ применения различных сверхразрешающих методов для оценки параметров разработанной модели канала.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Представленные в диссертации методы и алгоритмы оценивания канала высокоомобильных пользователей систем связи могут быть использованы как в современных системах сотовой связи, так и при разработке перспективных систем сотовой связи нового поколения, использующих в своем составе многоэлементные антенные решетки и гибридные схемы формирования диаграмм направленности. Эффективность разработанных алгоритмов подтверждается представленными в данной диссертационной работе результатами компьютерного моделирования,

проведенного в соответствии с методологиями, утвержденными международными комитетами стандартизации.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждаются их сравнением с результатами, полученными с помощью математического моделирования, с опубликованными результатами для частных случаев, а также отсутствием противоречий результатов диссертации известным положениям теории статистической радиофизики и теории информации.

Положения, выносимые на защиту

1. Итеративный алгоритм восстановления канала в системах связи использующих гибридные схемы формирования диаграмм направленности на базовых станциях и его модификация для динамически меняющихся каналов с использованием методов предсказания.

2. Параметрический алгоритм предсказания канальных коэффициентов высокоомобильных пользователей на дробный шаг, основанный на полигармоническом представлении канальных коэффициентов и использовании методов сверхразрешения для оценки параметров модели канала.

3. Применение сверхразрешающего метода минимального многочлена адаптированного для оценки параметров модели канальных коэффициентов, используемой в параметрическом алгоритме предсказания.

Апробация результатов и публикации

Результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- 5-th International Professor's Day on ICT Algorithm Design (ICTAD-2018). Москва, 2018.
- XXV-я международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии». Нижний Новгород, 2019.
- Wireless Communication Workshop. Сочи, 2019.
- 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). Долгопрудный, 2019.
- XXIII-я научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2019.
- XXVI-я международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии». Нижний Новгород, 2020.
- XXIV-я научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, 2020.

Основные материалы диссертации опубликованы в 8 работах. Среди них 1 статья включена в базу данных RSCI (*Russian Science Citation Index*) («Журнал радиоэлектроники» [A1]), 2 статьи в журналах, включенных в библиографическую базу данных Web of Science («Известия вузов. Радиофизика» [A2], «Акустический журнал» [A3]), и 5 работ, представляющие собой опубликованные материалы докладов [A4 – A8] на научных конференциях.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в получении всех результатов, представленных в данной диссертационной работе. Он участвовал в постановке задач, непосредственной разработке алгоритмов, проведении аналитических расчетов и компьютерного моделирования, а также участвовал в обсуждении полученных результатов и подготовке их к печати.

Структура и объем диссертации

Настоящая диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 109 страниц, включая 40 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 85 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** освещается современное состояние проблемы создания новых методов оценивания канала мобильных пользователей в системах связи 5-го поколения. Представлены обзор литературы по теме исследований, цели и задачи работы, научная новизна диссертации, научная и практическая значимость работы, методы исследования, данные об апробации результатов и публикациях по теме диссертационного исследования, структура и объем работы, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации рассмотрена проблема восстановления полной канальной матрицы в системах радиосвязи с многоэлементными антеннами, использующими гибридные цифро-аналоговые диаграммообразующие схемы. Предложен эффективный итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы. Рассмотрены возможные методы улучшения эффективности предложенного алгоритма в случае динамически меняющегося канала для мобильных пользователей. Исследована зависимость точности восстановления полной канальной матрицы от скорости пользователя. С помощью численного моделирования показано, что предложенный алгоритм позволяет добиться высокой точности восстановления полной канальной матрицы для динамически изменяющихся каналов мобильных пользователей.

В разделе 1.1 дано краткое описание общей архитектуры сети мобильной сотовой связи. Представлена информация о частотно-временной структуре сигналов, используемых в системах LTE (Long Term Evolution) и NR (New Radio). Также представлена информация о методах и пилотных сигналах, используемых для оценки канала в системах сотовой связи 5-го поколения.

В разделе 1.2 представлены различные схемы формирования диаграмм направленности на антенных решетках базовых станций. Приведено подробное описание гибридной диаграммообразующей схемы. Ключевым преимуществом данной схемы формирования диаграмм направленности многоэлементных антенн является использование существенно меньшего количества относительно дорогих блоков аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП/ЦАП) по сравнению с количеством антенных элементов. При этом высокую гибкость и

точность формирования диаграммы направленности обеспечивают недорогие аналоговые фазовращатели в блоках аналоговой обработки сигналов (АОС), число которых равно или больше общего числа элементов антенной решётки.

В разделе 1.3 представлено описание предложенного итеративного алгоритма восстановления полной канальной матрицы, основанного на разложении канальной матрицы по ортогональным диаграммообразующим векторам аналоговых подрешёток антенной системы.

Рассмотрим $\mathbf{H}_{mn}$ – блок полной канальной матрицы, соответствующий группе L антенных элементов базовой станции, подключенной к АЦП/ЦАП с индексом m , и антенному элементу пользователя с индексом n . Блок $\mathbf{H}_{mn}$ представляет собой вектор размерностью $(L \times 1)$. В каждый момент времени t блок $\mathbf{H}_{mn}$ может быть представлен в виде разложения в некотором векторном базисе $\mathbf{F}$:

$$\mathbf{H}_{mn}(t) = \sum_{k=1}^L a_{mnk}(t) \cdot \mathbf{f}_k = \mathbf{F} \mathbf{a}_{mn}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1 \quad \mathbf{f}_2 \quad \dots \quad \mathbf{f}_L], \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_{mn} = [a_{mn1} \quad a_{mn2} \quad \dots \quad a_{mnL}]^T. \quad (3)$$

Для вычисления вектора коэффициентов разложения $\mathbf{a}_{mn}$ необходимо решить систему линейных уравнений (1). Если базис $\mathbf{F}$ является ортогональным, то коэффициенты разложения могут быть найдены через скалярное произведение блока канальной матрицы $\mathbf{H}_{mn}$ и векторов базиса $\mathbf{F}$ следующим образом:

$$a_{mnk}(t) = \mathbf{f}_k^H \mathbf{H}_{mn}(t), \quad (4)$$

$$\mathbf{a}_{mn}(t) = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{H}_{mn}(t) = \mathbf{F}^H \mathbf{H}_{mn}(t). \quad (5)$$

Скалярное произведение (4) может быть реализовано аппаратно с помощью выставления вектора-фазора аналоговых фазовращателей $\mathbf{f}_k = [e^{j\phi_1}, \dots, e^{j\phi_L}]$, подключаемых к одному сумматору и АЦП/ЦАП, равному соответствующему вектору ортогонального базиса $\mathbf{F}$. Значения коэффициента разложения a_{mnk} могут быть оценены в момент приема известного пилотного сигнала, передаваемого по каналу обратной связи от пользовательской станции к базовой станции, с помощью стандартных алгоритмов оценки канала [8, 40, 42].

При приеме одного пилотного сигнала может быть применен только один вектор аналоговых весовых коэффициентов, и как следствие, может быть вычислен только один коэффициент разложения a_{mnk} . То есть для вычисления L коэффициентов разложения необходимо последовательно L раз при приеме пилотных сигналов применять соответствующие вектора аналоговых коэффициентов из базиса $\mathbf{F}$. При этом на каждой временной итерации алгоритма обновляется один из коэффициентов разложения a_{mnk} . Поэтому при нахождении оценки блока канальной матрицы $\hat{\mathbf{H}}_{mn}(t)$ в текущий момент времени t приходится использовать частично «устаревшие» значения коэффициентов a_{mnk} , измеренный в предыдущие моменты времени:

$$\hat{\mathbf{H}}_{mn}(t) = \sum_{k=1}^L a_{mnk}(t+k-L) \cdot \mathbf{f}_k, \quad (6)$$

где за единицу времени принят период следования пилотных сигналов.

В разделе 1.4 описаны алгоритмы предсказания, применяемые для прогнозирования значений коэффициентов разложения a_{mnk} с целью повышения точности и эффективности итеративного алгоритма (6). Следует отметить, что в рамках поставленной задачи предсказание коэффициентов необходимо осуществлять на дробный, относительно периода измерения конкретного коэффициента разложения, шаг. Рассмотрен алгоритм линейного предсказания на основе авторегрессионной модели, а также алгоритм линейного предсказания непосредственно на дробный шаг, основанный на интерполяционной формуле Уиттекера-Шеннона

В разделе 1.5 приводятся результаты численного моделирования эффективности итеративного алгоритма восстановления полной канальной матрицы. В качестве модели канала была выбрана стандартная модель 3GPP 3D Urban Macro [43]. Проведено сравнение эффективности данного алгоритма с применением различных техник прогнозирования.

В качестве метрики эффективности исследуемого алгоритма оценивания канальной матрицы была выбрана метрика ρ_0 , характеризующая среднюю потерю мощности, вызванную ошибками в выборе диаграммообразующего вектора $\mathbf{w}$ на основе восстановленного канала

$$\rho_0 = \left\langle \frac{\hat{\mathbf{w}}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \hat{\mathbf{w}}}{\mathbf{w}_{opt}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{w}_{opt}} \right\rangle, \quad (7)$$

где $\mathbf{H}$ – истинная матрица канальных коэффициентов в момент передачи информационных данных базовой станцией, $\hat{\mathbf{W}}$ – выбранный на основе оценки канальной матрицы вектор весовых коэффициентов для передачи, $\mathbf{W}_{opt}$ – оптимальный весовой вектор, максимизирующий отношение сигнал/шум (ОСШ) на пользовательской станции, ведущей приём сигнала.

На рисунке 1 представлены полученные по результатам моделирования зависимости значения метрики ρ_0 (эффективности фокусирования мощности на пользователе) от относительной скорости движения приёмно-передающих станций v . На рисунке 1 кривая I (синяя линия) соответствует предложенному итеративному алгоритму восстановления полной канальной матрицы без применения техник предсказания. Кривая II (зелёная линия) соответствует итеративному алгоритму восстановления полной канальной матрицы с применением линейного предсказания на целый шаг и линейной интерполяции (первый подход). Результаты для итеративного алгоритма восстановления, применённого совместно с алгоритмом предсказания на дробный шаг (второй подход), представлены кривой III (красный цвет). Кривая IV (чёрного цвета) на рисунке 1 задаёт верхнюю границу достижимой точности алгоритма восстановления канала для полностью цифровой антенной решётки, когда оценка полной канальной матрицы возможна на каждом пилотном сигнале.

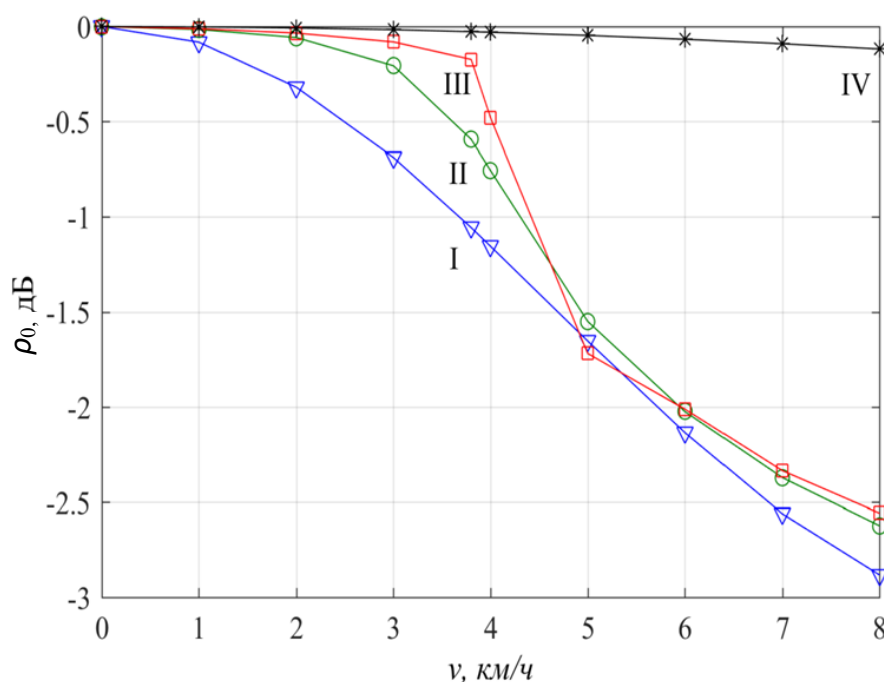


Рис. 1 Зависимость значения метрики ρ_0 эффективности настройки диаграммы направленности антенной системы базовой станции от относительной скорости движения пользовательских приёмо-передающих станций ν

Из приведенных на рисунке 1 кривых видно, что в случае статического канала предложенный итеративный алгоритм позволяет точно восстановить канальную матрицу. Потери по сравнению с максимальным возможным ОСШ в этом случае отсутствуют. С увеличением взаимной относительной скорости приёмника и передатчика величина потерь существенно увеличивается и составляет около 3 дБ при скорости 8 км/ч. Данный эффект связан с тем, что информация о коэффициентах разложения обновляется в четыре раза реже, чем период следования пилотных сигналов (один раз в 40 мс). Видно, что применение алгоритмов предсказания позволяет существенно уменьшить величину потерь при скоростях менее 5 км/ч. Так, при скорости 3 км/ч величина потерь составляет 0.69 дБ для алгоритма без предсказания, 0.2 дБ для алгоритма предсказания на целый шаг и линейной интерполяции (первый подход) и 0.08 дБ для алгоритма предсказания на дробный шаг (второй подход). При этом минимальная достижимая величина потерь при заданном периоде следования пилотных сигналов составляет 0.02 дБ. Таким образом, применение алгоритмов предсказания позволило получить выигрыш по мощности на 0.49 дБ и 0.61 дБ для первого и второго подхода соответственно и существенно приблизиться к случаю идеально известного канала.

В разделе 1.6 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённых в первой главе исследований.

Во второй главе диссертации рассмотрена проблема предсказания характеристик канала связи для высокомобильных пользователей системы связи LTE с полностью цифровыми антенными решетками на базовых станциях. Предложен алгоритм предсказания канальных коэффициентов на основе параметризованной

авторегрессионной модели, для оценки параметров которой предлагается использовать сверхразрешающие методы спектрального анализа. Путем численного моделирования с использованием симулятора системного уровня LTE системы сотовой связи проведена оценка эффективности предложенного алгоритма, а также его сравнение с алгоритмом предсказания на основе описанного в первой главе настоящей работы автокорреляционного подхода и интерполяционной формулы Уиттекера-Шеннона. Показано, что предложенный алгоритм позволяет добиться более высокой точности предсказания характеристик канала связи высокоскоростных пользователей, сопоставимой с точностью оценки канальных характеристик пользователей, движущихся на малых скоростях.

В разделе 2.1 приводится обоснование необходимости применения алгоритмов предсказания канальных коэффициентов на дробный шаг для повышения точности формирования диаграммы направленности на момент времени передачи данных.

В разделе 2.2 алгоритм линейного предсказания на дробный шаг, основанный на корреляционном подходе с использованием интерполяционной формулы Уиттекера – Шеннона, использованный в первой главе настоящей работы для предсказания значений коэффициентов разложения канальной матрицы, адаптирован и применен для предсказания значений самих канальных коэффициентов.

В разделе 2.3 предложен новый параметрический подход к предсказанию канала на дробный шаг, основанный на гармоническом представлении зависимости канальных коэффициентов от времени.

$$h_q(t) = \sum_{k=1}^J A_{kq} e^{i\omega_k t}. \quad (8)$$

Здесь канальный коэффициент на q -ой поднесущей представлен в виде суммы гармонических сигналов с постоянными во времени частотами ω_k и комплексными амплитудами A_{kq} , а каждая гармоника соответствует отдельному k -му кластеру лучей канала с определенным доплеровским сдвигом частоты (J общее число кластеров).

Подобное представление сигнала $h_q(t)$ имеет явный физический смысл. Изменение $h_q(t)$ во времени определяется в первую очередь эффектом Доплера. Каждая гармоника в представленном спектре соответствует некоторому кластеру в многолучевом канале связи, который приходит с определенного направления на базовую станцию и поэтому обладает индивидуальным доплеровским сдвигом частоты.

Используя авторегрессионную модель, оценку канального коэффициента в момент времени $(t+d)$, где $d \in (0,1)$, можно представить в виде линейной комбинации K последних измеренных значений $h_q(t)$.

$$\hat{h}_q(t+d) = \sum_{k=0}^{K-1} b_k^* h_q(t-k), \quad (9)$$

где K - порядок предсказания канальных коэффициентов, b_k – коэффициенты авторегрессии.

Показано, что использование линейной авторегрессии (9), позволяет предсказать значение канального коэффициента на основе K его последних измеренных значений и информации о положении гармоник ω_k , не требуя явного вычисле-

ния амплитуд кластеров A_{kq} , и, следовательно, позволяет производить оценку параметров модели значительно реже.

В разделе 2.4 рассмотрена задача применения алгоритмов сверхразрешения для оценки параметров предложенной модели изменения канальных коэффициентов (8). При реализации параметрического алгоритма предсказания размер временной выборки L ограничен временем корреляции медленно меняющихся комплексных амплитуд A_{kq} канальных кластеров, которые считаются постоянными в рамках предложенной сигнальной модели (8). Поэтому для достижения высокой точности предсказания необходимо найти баланс между разрешающей способностью метода оценки параметров модели и временем, на котором сигнал соответствует этой модели. В связи с этим целесообразно использовать сверхразрешающие методы спектрального анализа, для которых разрешающая способность при коротких выборках превышает предел Релея.

В разделе 2.5 для повышения точности оценки параметров модели канала предложен и реализован метод пространственной фильтрации, что позволило получить дополнительный выигрыш в точности прогнозирования и пропускной способности системы связи. Данный метод учитывает многолучевость распространения радиосигналов и позволяет более эффективно использовать пространственные свойства каналов сотовой связи. Основная идея метода пространственной фильтрации заключается в том, что предложенный в данной главе параметрический алгоритм предсказания применяется не к коэффициентам канальной матрицы, а к коэффициентам разложения данной канальной матрицы в ортогональном базисе. Показано, что метод дополнительной пространственной фильтрации позволяет более эффективно и с более высокой точностью осуществлять оценку числа гармоник и их частот в доплеровском спектре.

В разделе 2.6 представлены результаты численного моделирования с помощью симулятора системного уровня сети LTE. Анализ эффективности исследуемых алгоритмов проводился на основе двух параметров: средней скорости передачи данных базовой станцией Th и метрики ρ , характеризующей точность предсказания характеристик канала. В качестве метрики ρ рассматривался средний по частоте, времени и пользователям квадрат модуля скалярного произведения главных сингулярных векторов $\mathbf{v}_1$ и $\hat{\mathbf{v}}_1$ истинной и предсказанной канальных матриц соответственно.

$$\rho = \langle |\mathbf{v}_1^H \hat{\mathbf{v}}_1|^2 \rangle. \quad (10)$$

В разделе 2.6.1 проведено сравнение эффективности корреляционного подхода к предсказанию канала и разработанного параметрического алгоритма. В качестве модели канала была выбрана модель 3GPP 3D Urban Macro [43].

Зависимость метрики ρ и средней скорости передачи данных базовой станции Th от подвижности пользователей представлены на рисунках 2 и 3 соответственно. Кривыми красного цвета показаны метрики для случая, когда предсказание канала не применялось. Кривые, соответствующие алгоритму предсказания на основе корреляционного подхода, обозначены синим цветом, а кривые, соответствующие предложенному параметрическому алгоритму предсказания – желтым.

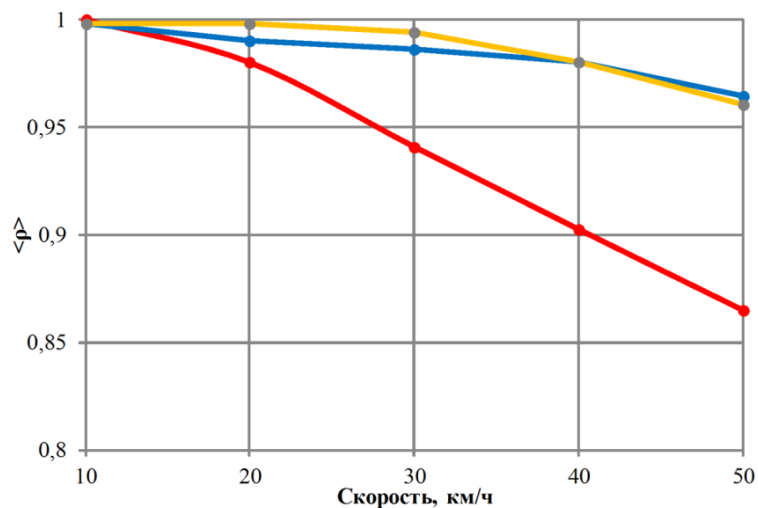


Рис. 2 Зависимость метрики ρ от подвижности пользователей

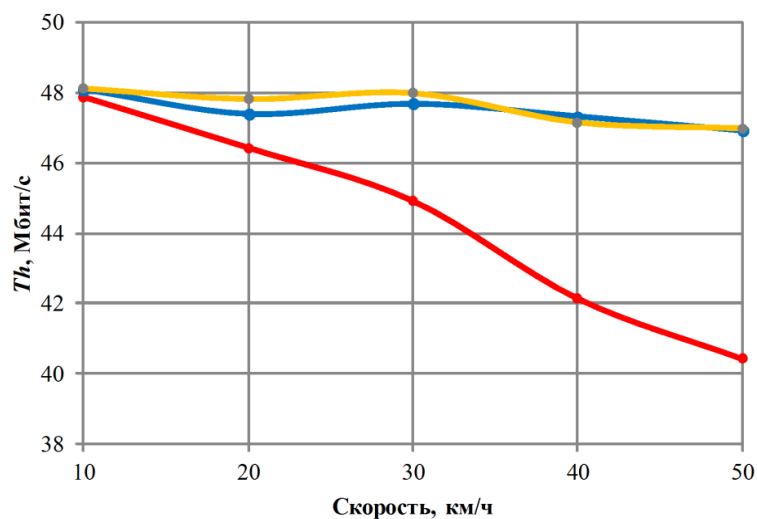


Рис. 3 Зависимость средней скорости передачи данных базовой станцией Th от подвижности пользователей

Видно, что при увеличении скорости абонентов без применения алгоритмов предсказания значение метрики ρ резко снижается. Так для скорости 50 км/ч значение метрики ρ составляет 86% (см. рисунок 2), что в свою очередь приводит к уменьшению скорости передачи данных на 16% (см. рисунок 3).

Применение алгоритмов предсказания позволило существенно повысить достоверность информации о характеристиках канала связи на интервалах между пилотными сигналами и увеличить скорость передачи данных. Так для высокомобильных пользователей со скоростью движения до 50 км/ч пропускная способность системы связи практически не снижалась и соответствовала пропускной способности малоподвижных пользователей.

Сравнение разработанного параметрического алгоритма с алгоритмом, основанным на автокорреляционном подходе и формуле Уиттекера – Шеннона, показало, что данные алгоритмы сопоставимы по эффективности. Однако для мо-

бильных устройств со средними скоростями параметрический алгоритм демонстрирует более высокую точность прогнозирования.

При этом следует отметить, что реализация алгоритма предсказания, основанного на автокорреляционном подходе, оказывается существенно более сложной, поскольку оценка корреляционных функций комплексных канальных коэффициентов, необходимая для удовлетворительной аппроксимации интерполяционного ряда, требует обработки существенно большего объема данных. Предложенный параметрический алгоритм предсказания канала позволяет на порядок уменьшить объем хранимой временной выборки и при этом требует относительно невысоких вычислительных затрат.

В разделе 2.6.2 приведена оценка эффективности параметрического алгоритма предсказания с использованием метода пространственной фильтрации. Показано, что применение дополнительной пространственной фильтрации позволяет добиться выигрышей, как в значениях метрики ρ , так и в скорости передачи данных Th . В качестве модели канала была выбрана модель 3GPP 3D Urban Macro [43].

В разделе 2.6.3 проведена оценка эффективности параметрического алгоритма в условиях квазидетерминированной модели канала. Результаты компьютерного моделирования, представленные в разделах 2.6.1 и 2.6.2, получены при использовании модели канала 3GPP 3D Urban Macro, построенной на основе TR 36.873 [43]. Данная модель канала общепризнана и повсеместно используется производителями оборудования и разработчиками новых технологий при стандартизации и различных исследованиях. Однако эта модель является полностью стохастической и не дает возможности точно промоделировать движение пользователя с учетом меняющейся структуры отражателей, а соответственно и путей распространения радиосигнала.

Поэтому эффективность предложенного параметрического алгоритма предсказания была также исследована путем компьютерного моделирования на системном уровне с использованием одной из новейших моделей канала QuaDRiGa, позволяющей проводить виртуальные полевые испытания систем сотовой связи [44, 45]. QuaDRiGa является трехмерной моделью канала, которая учитывает реальную геометрию распространения лучей в канале связи и использует квазидетерминистический подход к моделированию лучей, который в настоящее время уже успешно используется при стандартизации и моделировании систем связи миллиметрового диапазона длин волн [46-48].

Проведенное исследование показало высокую эффективность разработанного параметрического алгоритма предсказания в условиях квазидетерминированной модели канала связи.

В разделе 2.7 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенных во второй главе исследований.

В третьей главе диссертации рассмотрена задача применения параметрического алгоритма предсказания канальных коэффициентов мобильных пользователей системы связи LTE с использованием для оценки параметров модели сверхразрешающего корневого метода минимального многочлена [49, 50], который является одним из наиболее эффективных методов наряду с методом Root MUSIC (MUltiple SIgnal Classification). Однако в отличие от метода MUSIC метод минимального многочлена дает возможность одновременно оценить число гармониче-

ских сигналов и построить матричный проектор на шумовое подпространство, и не требует дополнительных критериев, таких как AIC (Akaike's Information Criterion) или MDL (Minimum Description Length) для оценки параметров модели.

В разделе 3.1 представлено описание метода минимального многочлена, адаптированного для оценки параметров параметрической модели канального коэффициента, используемой в разработанном параметрическом алгоритме предсказания.

В разделе 3.1.1 рассмотрены основные свойства минимального многочлена при условии, что точная корреляционная матрица канального коэффициента $\mathbf{R}$ является известной. Показано, что степень минимального многочлена определяется числом гармоник в доплеровском спектре канального коэффициента.

В разделе 3.1.2 рассмотрен метод определения числа гармоник в спектре канального коэффициента, который основан на аппроксимации минимального многочлена корреляционной матрицы для случая выборочной корреляционной матрицы, когда минимальный многочлен переходит в характеристический, и его степень перестает зависеть от числа J гармоник в спектре канального коэффициента. Используется статистически обоснованная итеративная процедура аппроксимации минимального многочлена некоторым многочленом минимальной степени, который обеспечивает отличие от минимального многочлена, не превышающее (в среднеквадратическом смысле) некоторое пороговое значение Thr .

Далее на основе оцененных параметров минимального многочлена строится $\hat{\mathbf{P}}_{noise}$ матрица-проектора на шумовое подпространство в виде

$$\hat{\mathbf{P}}_{noise} = \left[\prod_{p=1}^J (\mathbf{I} - \gamma_p \hat{\mathbf{R}}) \right] \cdot \left[\prod_{p=1}^J \left(1 - \frac{\gamma_p}{\gamma_{J+1}} \right) \right]^{-1}, \quad (11)$$

где коэффициенты γ_n представляют собой величины, обратные собственным числам выборочной корреляционной матрицы. Сформируем разрешающую функцию вида

$$\eta(\omega) = \frac{1}{\mathbf{f}^H(\omega) \hat{\mathbf{P}}_{noise} \mathbf{f}(\omega)}, \quad (12)$$

где $\mathbf{f}(\omega) = [e^{i\omega(L-1)} e^{i\omega(L-2)} \dots 1]^T$, а L - число временных отсчетов канального коэффициента.

Рассмотрев знаменатель метрики (12), можно применить корневой подход к определению угловых частот гармоник в спектре канального коэффициента

$$\mu(\omega) = \mathbf{f}^H(\omega) \hat{\mathbf{P}}_{noise} \mathbf{f}(\omega). \quad (13)$$

Представленное выражение обращается в ноль тогда и только тогда, когда $\omega = \omega_k$. Выполним в (13) замену $z = e^{i\omega}$. В результате в случае точного проектора на шумовое подпространство получим полином степени $(2L - 2)$

$$\mu(z) = \mathbf{z}^{(-1)} \hat{\mathbf{P}}_{noise} \mathbf{z}, \quad (14)$$

где $\mathbf{z} = [z^{(L-1)} z^{(L-2)} \dots 1]^T$ и $\mathbf{z}^{(-1)} = [z^{-(L-1)} z^{-(L-2)} \dots 1]$. Среди корней данного полинома следует отобрать J лежащих наиболее близко к единичной окружности, для которых выполнено условие $|z| \leq 1$ либо $|z| \geq 1$, так как корни $\eta(z)$ являются инверсными в комплексной плоскости относительно единичной окружности. Искомые значения угловых частот ω_k получаются из отобранных корней путём обратной замены.

В разделе 3.2 представлены результаты численного моделирования с помощью симулятора системного уровня сети LTE. Рассмотрена эффективность параметрического алгоритма предсказания с использованием корневого метода минимального многочлена. Осуществлено сравнение данного алгоритма с алгоритмом на основе корреляционного подхода. Также проведено сравнение эффективности работы параметрического алгоритма при использовании различных сверхразрешающих методов. Анализ эффективности исследуемых алгоритмов проводился на основе двух параметров: средней скорости передачи данных базовой станцией Th и метрики ρ , характеризующей качество предсказания характеристик канала. В качестве модели канала была выбрана модель 3GPP 3D Urban Macro [43].

В разделе 3.2.1 представлено сравнение эффективности параметрического алгоритма предсказания с корневым методом минимального многочлена и алгоритма предсказания на основе корреляционного подхода. Показано, что применение корневого метода минимального многочлена в составе параметрического алгоритма предсказания не уступает известному алгоритму на основе автокорреляционного подхода, и превосходит его в диапазоне скоростей 15 -35 км/ч.

В разделе 3.2.2 представлено сравнение эффективности параметрического алгоритма предсказания с использованием корневого метода минимального многочлена и с использованием метода Кейпона. На основе проведенного исследования было установлено, что применение в качестве метода сверхразрешения метода Кейпона не позволяет добиться столь же высоких значений, как в метрике ρ , так и в средней скорости передачи данных базовой станцией в отличие от корневого метода минимального многочлена.

В разделе 3.2.3 представлено сравнение эффективности параметрического алгоритма предсказания с использованием корневого метода минимального многочлена и с использованием метода Root MUSIC. Показано, что оба метода позволяют добиться практически идентичной эффективности параметрического алгоритма предсказания канальных коэффициентов, позволяя существенно снизить уровень потерь. При этом следует отметить что, применение метода минимального многочлена позволяет избежать использования дополнительных критериев при оценке числа гармоник в параметрической модели изменения канальных коэффициентов, что позволяет упростить практическую реализацию параметрического алгоритма предсказания.

В разделе 3.3 сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенных в третьей главе исследований.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе данного диссертационного исследования, подведены итоги, сделаны теоретические и практические выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан итеративный алгоритм оценивания и восстановления полной канальной матриц для LTE систем связи, использующих гибридные схемы формирования диаграммы направленности. Метод основан на использовании для оценки

канальной матрицы пилотных сигналов восходящего канала связи и не требует дополнительных частотно-временных ресурсов. Для увеличения точности восстановления полной канальной матрицы в случае динамически меняющегося канала применены алгоритмы предсказания. Полученные путем компьютерного моделирования результаты показали высокую эффективность разработанных алгоритмов для мобильных пользователей. В частности показано, что применение итеративного алгоритма восстановления к системам с гибридными антенными решетками позволяет добиться точности представления канала близкого к случаю использования полностью цифровой антенной решетки.

2. Разработан параметрический алгоритм предсказания канала на дробный шаг для высокомобильных пользователей в LTE системах связи. В основе алгоритма лежит параметрическая модель изменения канальных коэффициентов, которая представляет канальные коэффициенты в виде суперпозиции различных гармонических составляющих, частоты которых определяются доплеровскими сдвигами, возникающими при движении пользователя в условиях многолучевого распространения сигналов. Оценка параметров данной модели осуществляется путем применения сверхразрешающих алгоритмов спектрального анализа. Путем компьютерного моделирования на системном уровне проведено сравнение разработанного параметрического алгоритма с известным методом предсказания на дробный шаг на основе классического автокорреляционного подхода. Показано, что параметрический алгоритм для типичных средних скоростей движения пользователей (до 35 км/ч) превосходит метод прогнозирования на основе автокорреляционного подхода и требует значительно меньших ресурсов для хранения временной выборки. Предложена модификация параметрического алгоритма на основе применения метода дополнительной пространственной фильтрации принимаемых пилотных сигналов, что позволило достичь улучшения эффективности алгоритма для скоростей пользователей более 30 км/ч. Проведено компьютерное моделирование, подтвердившее высокую эффективность разработанного алгоритма в условиях наиболее реалистичной квазидетерминированной модели канала.

3. Осуществлено совместное применение параметрического алгоритма и сверхразрешающего корневого метода минимального многочлена для задач предсказания каналов высокомобильных пользователей LTE систем связи. При этом известный метод минимального многочлена адаптирован для решения задач спектрального анализа. Путем компьютерного моделирования на системном уровне проведена оценка эффективности данного подхода. Осуществлено сравнение с алгоритмом предсказания на основе корреляционного подхода, а также с параметрическим алгоритмом, использующим другие известные сверхразрешающие методы. Показано, что данный вариант параметрического алгоритма существенно превосходит по качеству предсказания параметрический алгоритм с использованием сверхразрешающего метода Кейпона, и обладает сравнимой с параметрическим алгоритмом на основе метода Root MUSIC эффективностью. Однако использование сверхразрешающего метода минимального многочлена не требует применения дополнительных критериев для оценки числа гармонических сигналов в параметрической модели изменения канальных коэффициентов.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

А1. Купцов, В.В. Итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы в системах связи, использующих комбинированные аналого-цифровые диаграммообразующие схемы / В.В. Купцов, О.А. Шмонин, С.Н. Трушков, А.С. Михайлова // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2020. – №5. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may20/14/text.pdf>, 2020.

А2. Купцов, В.В. Параметрический алгоритм предсказания характеристик канала для высококомобильных пользователей в системе связи LTE / В.В. Купцов, О.А. Шмонин, С.Н. Трушков, А.С. Михайлова // Изв. вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63 № 4. – С. 344–355.

А3. Ермолаев, В.Т. Метод минимального многочлена для оценки параметров сигналов, принимаемых антенной решеткой / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, А.В. Елохин, В.В. Купцов // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 1. – С. 78-85.

А4. Купцов, В.В. Восстановление полной канальной матрицы в системах связи, использующих гибридные антенные решетки / В.В. Купцов, О.А. Шмонин, С.Н. Трушков, А.С. Михайлова // Труды XXVI-й международной конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2020). – Н. Новгород: НГТУ, 2020. – С. 1258 – 1265.

А5. Купцов, В.В. Сравнительный анализ методов предсказания канала для высококомобильных пользователей в LTE системах связи / В.В. Купцов, О.А. Шмонин, С.Н. Трушков, А.С. Михайлова // Труды XXV-й международной конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2019). – Н. Новгород: НГТУ, 2019. – С. 42-47.

А6. Купцов, В.В. Параметрический метод предсказания канала для высококомобильных пользователей в LTE системах связи / В.В. Купцов, [и др.] // Труды XXIII-й научной конференции по радиофизике. – Н. Новгород: ННГУ, 2019. – С. 352-355.

А7. Kuptsov, V. Parametrized autoregressive channel prediction algorithm for moving LTE users / V. Kuptsov, O. Shmonin, S. Trushkov, A. Mikhailova // International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). – Dolgoprudny, 2019. – P. 1-4.

А8. Купцов, В.В. Сравнительный анализ эффективности применения алгоритмов сверхразрешения при оценке параметров параметрического метода предсказания канала для высококомобильных пользователей в LTE системах связи / В.В. Купцов, О.А. Шмонин, С.Н. Трушков, А.С. Михайлова // Труды XXIV-й научной конференции по радиофизике. – Н. Новгород: ННГУ, 2020. – С. 294-297.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение	5
ГЛАВА 1 Алгоритмы восстановления полной канальной матрицы в системах связи, использующих гибридные диаграммообразующие схемы	17
1.1 Оценка канала в системах связи нового поколения	17
1.2 Схемы формирования диаграмм направленности в многоэлементных антенных решетках	22

1.3 Итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы в системах с цифро-аналоговым (гибридным) формированием диаграммы направленности	26
1.4 Алгоритмы предсказания коэффициентов разложения канальной матрицы в ортогональных базисах	32
1.5 Результаты компьютерного моделирования	36
1.6 Заключение по первой главе.....	47
ГЛАВА 2 Параметрический алгоритм предсказания канала для высокомобильных пользователей систем сотовой связи 5-го поколения.....	49
2.1 Применение алгоритмов предсказания в LTE системах связи	49
2.2 Корреляционный подход к предсказанию канальных коэффициентов	52
2.3 Параметрический алгоритм предсказания канальных коэффициентов.....	53
2.4 Оценка параметров детерминистской модели канальных коэффициентов.....	59
2.5 Метод дополнительной пространственной фильтрации	62
2.6 Результаты компьютерного моделирования	66
2.6.1 Сравнение эффективности корреляционного подхода к предсказанию канала и разработанного параметрического алгоритма	66
2.6.2 Оценка эффективности параметрического алгоритма предсказания с использованием метода пространственной фильтрации	73
2.6.3 Оценка эффективности параметрического алгоритма в условиях квазидетерминированной модели канала.	75
2.7 Заключение по второй главе.....	79
ГЛАВА 3 Параметрический алгоритм предсказания канала с использованием корневого метода минимального многочлена	81
3.1 Метод минимального многочлена	81
3.1.1 Детерминистическое приближение	82
3.1.2 Статистическое приближение.....	83
3.2 Результаты компьютерного моделирования	88
3.2.1 Сравнение эффективности параметрического алгоритма предсказания с корневым методом минимального многочлена и алгоритма предсказания на основе корреляционного подхода	89
3.2.2 Сравнение эффективности параметрического алгоритма предсказания с использованием корневого метода минимального многочлена и с использованием метода Кейпона.....	91
3.2.3 Сравнение эффективности параметрического алгоритма предсказания с использованием корневого метода минимального многочлена и с использованием метода Root MUSIC.....	94
3.3 Заключение по третьей главе.....	95
Заключение.....	97
Список используемых источников.....	100

Список используемых источников

1. Gampala, G. Massive MIMO — Beyond 4G and a basis for 5G / G. Gampala, C.J. Reddy // International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). – Denver, 2018. – P. 1–2.
2. Björnson, E. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency / E. Björnson, J. Hoydis, L. Sanguinetti // Foundations and Trends in Signal Processing. – 2017. – Vol. 11. No. 3-4. – P. 154–655.
3. Marzetta, T.L. Fundamentals of Massive MIMO / T.L. Marzetta, E.G. Larsson, H. Yang, H.Q. Ngo. – Cambridge university press, 2016. – 225 p.
4. Ngo, H.Q. Aspects of favorable propagation in Massive MIMO / H.Q. Ngo, E.G. Larsson, T.L. Marzetta // European Signal Processing Conference (EUSIPCO). – Lisbon, 2014. – P. 76-80.
5. Ngo, H.Q. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems / H.Q. Ngo, E.G. Larsson, T.L. Marzetta // IEEE Transactions on Communications. – 2013. – Vol. 61. No. 4. – P. 1436-1449.
6. Larsson, E.G. Massive MIMO for 5G / E.G. Larsson, L.V. der Perre // IEEE 5G Tech Focus. – 2017. – Vol. 1. No. 1. – P. 1–4.
7. Larsson, E.G. Maassive MIMO for next generation wireless systems / E.G. Larsson, O. Edfors, T.F. Tufvesson // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 22. No. 2. – P. 186–195.
8. Ермолаев, В.Т. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи: монография / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман. – Н. Новгород: ННГУ, 2011. – 368 с.
9. Adnan, N.H.M. Massive MIMO for Fifth Generation (5G): Opportunities and Challenges / N.H.M. Adnan, I.M. Rafiqul, A.H.M.Z. Alam // International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE) – Kuala Lumpur, 2016. – P. 47-52.
10. Marzetta, T.L. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas / T.L. Marzetta // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2010. – Vol. 9. No. 11. – P. 56–61.
11. Hoydis, J. Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need? / J. Hoydis, S. ten Brink, M. Debbah // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2013. – Vol. 31. No. 2. – P. 160–171.
12. Papazafeiropoulos, A.K. Impact of General Channel Aging Conditions on the Downlink Performance of Massive MIMO / A.K. Papazafeiropoulos // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2017. – Vol. 66. No. 2. – P. 1428–1442.
13. Papazafeiropoulos, A.K. Downlink performance of massive MIMO under General Channel Aging Conditions / A.K. Papazafeiropoulos // Proc. IEEE GLOBECOM. – San Diego, 2016. – P. 1-6.
14. Truong, K. Effects of Channel Aging in Massive MIMO Systems / K. Truong, R.

- Heath // Journal of Communications and Networks. – 2013. – Vol. 15. No. 4. – P. 338–351.
15. Casey, T. Influence of mobile user velocity on data transfer in a multi-network wireless environment / T. Casey, D. Denieffe, G. Muntean // 9th IFIP International Conference on Mobile Wireless Communications Networks. – Cork, 2007. – P. 126-130.
 16. Akl, R.A. Compensating for CQI aging by channel prediction: The LTE downlink / R.A. Akl, S. Valentin, G. Wunder, S. Stanczak // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – Anaheim, 2012. – P. 4821-4827.
 17. Oborina, A. Effect of mobile velocity on the system capacity in LTE DL / A. Oborina // International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. – Dubrovnik, 2013. – P. 1-4.
 18. Shams, A.B. Impact of user mobility on the performance of downlink resource scheduling in Heterogeneous LTE cellular networks / A.B. Shams, S.R. Abied, M.A. Hoque // 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT). – Dhaka, 2016. – P. 1-6.
 19. Miyim, A.M. Performance Evaluation of LTE Networks / A.M. Miyim, A. Wakili // 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO). – Abuja, 2019. – P. 1-6.
 20. Zhou, B. Impact of imperfect channel state information on TDD downlink Multiuser MIMO system / B. Zhou, [et al.] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. – Cancun, 2011. – P. 1823-1828.
 21. Mi, D. Massive MIMO Performance With Imperfect Channel Reciprocity and Channel Estimation Error / D. Mi, [et al.] // IEEE Transactions on Communications. – 2017. – Vol. 65. No. 9. – P. 3734-3749.
 22. Dahlman, E. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Academic Press, 2011. – 431 p.
 23. Sesia, S. The UMTS Long Term Evolution: from theory to practice / S. Sesia, I. Toufik, M. Baker. – 2nd edition – Wiley & Sons, 2011. – 792 p.
 24. Dahlman, E. 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. – Academic Press, 2018. – 466 p.
 25. Zhang, X. Variable-Phase-ShiftBased RF-Baseband Codesign for MIMO Antenna Selection / X. Zhang, A. Molisch, S.Y. Kung // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2005. – Vol. 53, No. 11. – P. 4091–4103.
 26. Molisch, A.F. Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey / A.F. Molisch, V.V. Ratnam, S. Han, [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2017. – Vol. 55, No. 9. – P. 134-141.
 27. Rozé, A. Comparison between a hybrid digital and analog beamforming system and a fully digital Massive MIMO system with adaptive beamsteering receivers in millimeter-Wave transmissions / A. Roze, M. Crussière, M. H  lard, C. Langlais // International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). – Poznan, 2016. – P. 86-91.
 28. Sun, S. Hybrid beamforming for 5G millimeter-wave multi-cell networks / S. Sun, T.S. Rappaport, M. Shaft // IEEE Conference on Computer Communications

- Workshops (INFOCOM WKSHPS). – Honolulu, 2018. – P. 589-596.
29. Vook, F.W. MIMO and beamforming solutions for 5G technology / F.W. Vook, A. Ghosh, T.A. Thomas // *EEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*. – Tampa, 2014. – P. 1-4.
 30. Zhao, X. Practical Hybrid Beamforming Schemes in Massive MIMO 5G NR Systems / X. Zhao, E. Lukashova, F. Kaltenberger, S. Wagner // *23rd International ITG Workshop on Smart Antennas*. – Vienna, 2019. – P. 1-8.
 31. Sohrabi, X. Practical Hybrid Beamforming Schemes in Massive MIMO 5G NR Systems / F. Sohrabi, W. Yu // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. – 2016. – Vol. 10. No. 3. – P. 501–513.
 32. Zhang, Y. Optimal Hybrid Beamforming Design for Millimeter-Wave Massive Multi-User MIMO Relay Systems / Y. Zhang, J. Du, Y. Chen, [et al.] // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 157212-157225.
 33. Yang, J. Optimal base station antenna downtilt in downlink cellular networks / J. Yang, M. Ding, G. Mao, [et al.] // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2019. – Vol. 18. No. 3. – P. 1779-1791.
 34. Castellanos, M.R. Channel Reconstruction-Based Hybrid Precoding for Millimeter Wave Multi-User MIMO Systems / M.R. Castellanos, V. Raghavan, J.H. Ryu, [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. – 2018. – Vol. 12. No. 2. – P. 383-398.
 35. Xiaohui, L. Gram-Schmidt based hybrid beamforming for mmWave MIMO systems / L. Xiaohui, L. Yingchao, M. Meimei, H. Yongqiang // *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*. – 2016. – Vol. 23. No. 6. – P. 53-59.
 36. Eisenbeis, J. Channel Estimation Method for Subarray Based Hybrid Beamforming Systems Employing Sparse Arrays / J. Eisenbeis, T. Mahler, P.R. Lopez, T. Zwick // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2018. – Vol. 87. – P. 25–38.
 37. Technical Specification TS 36.211 V12.4.0. Physical channels and modulation (Release 12) // *3rd Generation Partnership Project*. – 2014. – 124 p.
 38. Spencer, Q.H. An introduction to the multi-user MIMO downlink / Q.H. Spencer, C.B. Peel, A.L. Swindlehurst, M. Haardt // *IEEE Communications Magazine*. – 2004. – Vol. 42. No. 10. – P. 60-67.
 39. Kurve, A. Multi-user MIMO systems: the future in the making / A. Kurve // *IEEE Potentials*. – 2009. – Vol. 28. No. 6. – P. 37-42.
 40. Chen, C. Channel estimation for LTE and LTE-A MU-MIMO uplink with a narrow transmission band / C. Chen, D.W. Lin // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. – Florence, 2014. – P. 6484-6488.
 41. Ortiguera, M.D. Fractional Discrete-Time Signal Processing: Scale Conversion and Linear Prediction / M.D. Ortiguera, C.J. Matos, S. Moises, M.S. Piedade // *Nonlinear dynamics*. Kluwer Academic Publishers. – 2002. – Vol. 29. – P. 173-190.
 42. Pratschner, S. Single-User and Multi-User MIMO Channel / S. Pratschner, S.

- Schwarz, M. Rupp // IEEE International Conference on Communications (ICC). – Paris, 2017. – P. 1-6.
43. Technical Report TR 36.873 V12.1.0. Study on 3D channel model for LTE (Release 12) // 3rd Generation Partnership Project. – 2015. – 42 p
 44. Jaeckel, S. QuaDRiGa: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials / S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Bönner, L. Thi // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2014. – Vol. 62, No. 6. – P. 3242-3256.
 45. Jaeckel, S. Quasi Deterministic Radio Channel Generator, User Manual and Documentation / S. Jaeckel, [et al.] – Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, 2017. – 112 p.
 46. Weiler, R. Quasi-deterministic millimeter-wave channel models in MiWEBA / R. Weiler, [et al.] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – doi: <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0568-6>
 47. Maltsev, A. Quasi-deterministic approach to mmWave channel modeling in a non-stationary environment / A. Maltsev, [et al.] // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). – Austin, 2014. – P. 966-971.
 48. Трушков, С.Н. Применение квазидетерминированного подхода к моделям каналов миллиметрового диапазона длин волн стандарта IEEE 802.11 ad / С.Н. Трушков, В.В. Купцов, В.Е. Барабанов // Труды XXII-й научной конференции по радиофизике. – Н. Новгород: ННГУ, 2018. – С. 385-388.
 49. Ермолаев, В.Т. Оценивание параметров сигналов, принимаемых антенной решеткой / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, А.А. Анулин // Изв. вузов. Радиофизика. – 1996 – Т. 39 № 9. – С. 1144–1160.
 50. Ермолаев, В.Т. Угловое сверхразрешение сигналов в антенной решётке с помощью корневого метода минимального многочлена корреляционной матрицы / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, А.В. Елохин, О.А. Шмонин // Изв. вузов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61, № 3. – С. 261-272.