

О Т З Ы В
официального оппонента
на диссертационную работу Купцова Виталия Владимировича на тему
«РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕСТАЦИОНАРНЫХ КАНАЛОВ МОБИЛЬНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ
СОТОВОЙ СВЯЗИ 5-ГО ПОКОЛЕНИЯ», представленную на соискание ученой
степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.4 –Радиофизика

Для обеспечения высокого качества связи и достижения максимально возможной пропускной способности в современных системах связи широко используются многоэлементные антенные решетки с технологией massive MIMO (Multiple Input Multiple Output), которые позволяют за счет оптимального формирования диаграмм направленности на передатчике и приемнике осуществить параллельную передачу данных по нескольким пространственным подканалам одновременно и тем самым существенно повысить общую пропускную способность системы связи. Однако для эффективного формирования диаграмм направленности необходимо иметь достоверную информацию о канальной матрице (импульсных или частотных характеристиках). Необходимость точной оценки характеристик канала особенно важна для высокомобильных пользователей в современных системах связи 5-го поколения. В связи с быстрым перемещением пользователей оценка канала быстро устаревает, что ведет к существенной деградации качества связи и уменьшению скорости передачи данных в системе. Поэтому разработка новых методов и алгоритмов оценивания характеристик канала мобильных пользователей в настоящее время становится особенно актуальной. Диссертация Купцова В.В. посвящена решению этих задач для мобильных пользователей современных LTE (Long Term Evolution) и 5G NR (5-th Generation New Radio) систем сотовой связи, использующих на базовых станциях многоэлементные антенные решетки с цифровым и цифро-аналоговым формированием диаграмм направленности.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых источников, содержащего 85 наименований.

Во введении освещается современное состояние проблемы создания новых эффективных методов и алгоритмов 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 оценки полной канальной матрицы, основанный на разложении канальной матрицы по ортогональным диаграммообразующим векторам аналоговых подрешёток антенной системы. Рас-

смотрены возможные методы улучшения эффективности предложенного алгоритма в случае нестационарного канала мобильных пользователей. В частности описаны алгоритмы предсказания, применяемые для прогнозирования значений коэффициентов разложения канальной матрицы с целью повышения точности и эффективности итеративного алгоритма. Следует отметить, что в рамках поставленной задачи предсказание этих коэффициентов необходимо осуществлять на дробный шаг (относительно периода измерения конкретного коэффициента разложения). Рассмотрен алгоритм линейного предсказания на основе авторегрессионной модели, а также алгоритм линейного предсказания непосредственно на дробный шаг, основанный на интерполяционной формуле Уиттекера-Шеннона. 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.

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. Данный параметрический подход к предсказанию канала на дробный шаг, основан на гармоническом представлении зависимости канальных коэффициентов от времени. Однако, при реализации данного алгоритма предсказания размер временной выборки ограничен временем корреляции медленно меняющихся комплексных амплитуд канальных кластеров, которые считаются постоянными в рамках предложенной сигнальной модели. Поэтому автором было предложено использовать сверхразрешающие методы спектрального анализа, для которых разрешающая способность при коротких выборках превышает предел Релея. Применение алгоритмов сверхразрешения позволило найти баланс между разрешающей способностью метода оценки параметров модели и временем, на котором сигнал соответствует этой модели, а также достичь высокой точности предсказания. 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 высокомобильных пользователей, сопоставимой с точностью оценки канальных характеристик пользователей, движущихся на малых скоростях. 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.

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, 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 гармонических 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. Также следует отметить, что метод минимального многочлена эффективно использовался ранее в задачах оценки параметров сигналов (например, угловых координат источников сигналов), принимаемых антенной решеткой, но не исследовался для оценки параметров спектра сигнала. В первом разделе главы представлено описание метода минимального многочлена, адаптированного для оценки параметров параметрической модели канального коэффициента, используемой в разработанном параметрическом алгоритме предсказания. Рассмотрены основные свойства минимального многочлена при условии, что точная корреляционная матрица канального коэффициента является известной. Показано, что степень минимального многочлена определяется числом гармоник в доплеровском спектре канального коэффициента. Путем численного моделирования с использованием симулятора системного уровня проведена оценка эффективности совместного применения метода минимального многочлена и параметрического алгоритма предсказания канала. Проведено подробное сравнение с параметрическим алгоритмом предсказания, использующим методы Кейпона и Root MUSIC . Также 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/.

Научная обоснованность и достоверность результатов, сформулированных в диссертации не вызывает сомнений. Результаты диссертации оформлены в виде структурированного и хорошо проработанного текста со всеми необходимыми иллюстрациями. Цели работы формулируются подробно во введении и авторефере диссертации.

Несомненным достоинством диссертации является то, что разработанные для оценивания канала пользователей алгоритмы являются универсальными с точки зрения различных стандартов и не требуют дополнительных частотных и временных ресурсов и могут быть использованы в различных современных стандартах беспроводной связи

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В первой главе диссертации алгоритм восстановления полной канальной матрицы тестировался для случая, когда объединение антенных элемен-

тов решетки в цифровые порты осуществляется по столбцам. Не пояснено, почему не рассматривались другие конфигурации гибридных антенных решёток.

2. В диссертации для моделирования на системном уровне выбрана известная многолучевая модель канала мобильной сотовой связи 3GPP 3D Urban Macro. Однако не приводятся параметры этой модели (количество кластеров, количество лучей в кластере и т.д.).

3. На рисунке 2.8 приведена зависимость коэффициента корреляции главных собственных векторов канальных матриц от скорости движения пользователей. Возникает вопрос, какая величина этого коэффициента является приемлемой, а какая нет? Следующий рисунок 2.9 частично проясняет ситуацию. Однако возникает вопрос, всегда ли будет такая связь приведенного коэффициента и скорости передачи данных?

Указанные недостатки ни в коей мере не снижают положительной оценки диссертации В.В. Купцова, которая представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Основные результаты работы являются новыми, достоверными и обоснованными. Результаты работы достаточно полно отражены в 3 печатных работах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям действующего "Положения о присуждении учёных степеней" ВАК РФ, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Купцов Виталий Владимирович заслуживает присвоения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Официальный оппонент,

Заведующий лабораторией обработки многомерных сигналов

Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», к.ф.-м.н.

(специальность 01.04.03 - Радиофизика)

Родионов Александр Алексеевич

603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46

тел. (831) 416-47-74

email: alexr@ipfran.ru

«9» сентября 2022 г.

Подпись Родионова А.А. заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.



Корюкин И.В.