

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.03, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО"
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 28.09.2022 г. № 44

О присуждении Купцову Виталию Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Разработка алгоритмов оценивания характеристик нестационарных каналов мобильных пользователей в системах сотовой связи 5-го поколения» по специальности 1.3.4 — Радиофизика принята к защите 4 мая 2022 г., протокол № 35, диссертационным советом 24.2.340.03, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, приказом Рособрнадзора № 1990-1015/130 от 4 сентября 2007 г.

Соискатель, Купцов Виталий Владимирович, 23 августа 1993 года рождения, окончил магистратуру радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского в 2016 году. В 2020 году окончил аспирантуру Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия направленность 01.04.03 «Радиофизика» (квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь»). Одновременно с учебой в аспирантуре начал работать по совместительству ассистентом в «Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского» на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета и продолжает работать в настоящее время.

Диссертация выполнена на кафедре статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор Мальцев

Александр Александрович работает заведующим кафедрой статистической радиофизики и мобильных систем связи радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Чернояров Олег Вячеславович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.03 – Радиофизика), доцент, профессор кафедры электроники и наноэлектроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
2. Родионов Александр Алексеевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.03 – Радиофизика), заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», ФГБОУ ВО «ВГУ» , г. Воронеж, в своем положительном отзыве, утверждённом 02.09.2022 г., подписанным доктором технических наук Ю.Э. Корчагиным, заведующим кафедрой радиофизики, указала, что диссертация Купцова Виталия Владимировича удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Купцов Виталий Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 — Радиофизика.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы.

Основные результаты диссертации были представлены на международных и всероссийских конференциях. Личный вклад соискателя в опубликованные в соавторстве работы заключается в непосредственном участии в получении всех результатов, представленных в данных работах, постановке задач, непосредственной разработке алгоритмов, проведении аналитических расчетов и компьютерного моделирования, а также в обсуждении полученных результатов и подготовке их к печати. Проверка текста диссертации не выявила неправомерных заимствований. Исследования являются оригинальными и представляются к защите впервые. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Ермолаев В.Т., Флаксман А.Г., Елохин А.В., Купцов В.В. Метод минимального многочлена для оценки параметров сигналов, принимаемых антенной решеткой // Акустический журнал, Т. 64, № 1, 2018. С. 78-85. (Web of Science).
2. Купцов В.В., Шмонин О.А., Трушков С.Н., Михайлова А.С. Параметрический алгоритм предсказания характеристик канала для высокомобильных пользователей в системе связи LTE // Изв. вузов. Радиофизика, Т. 63, № 4, 2020. С. 344–355. (Web of Science).
3. Купцов В.В., Шмонин О.А., Трушков С.Н., Михайлова А.С. Итеративный алгоритм восстановления полной канальной матрицы в системах связи, использующих комбинированные аналого-цифровые диаграммообразующие схемы // Журнал радиоэлектроники, № 5. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/may20/14/text.pdf>, 2020. (Russian Science Citation Index)

На диссертацию и автореферат поступило 6 отзывов от следующих специалистов:

1. Кейстович Александр Владимирович, доктор технических наук по специальности 05.12.04 - Радиолокация и радионавигация, заслуженный изобретатель РФ, Главный научный сотрудник Центра инновационного развития АО "НПП "Полет".
2. Милов Владимир Ростиславович, доктор технических наук (специальность 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации) - руководитель проектов по научно-техническому развитию, профессор.
3. Парfenov Владимир Иванович, д.ф.-м.н., профессор кафедры радиофизики физического факультета ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет".
4. Серебряков Георгий Владимирович, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.03 - Радиофизика, директор Автономной некоммерческой организации "Научно-исследовательский институт СИТРОНИКС".
5. Тюрликов Андрей Михайлович, доктор технических наук по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации, заведующий кафедрой №25, ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения", профессор.
6. Хоров Евгений Михайлович, доктор технических наук по специальности 05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, заместитель директора.

Все отзывы положительные. В отзывах отмечается актуальность темы исследования, новизна полученных результатов и их значимость для науки и практики.

В отзывах на диссертацию и автореферат содержатся следующие замечания.

Замечания из отзыва ведущей организации.

В разделе 2.6 для осуществления анализа доплеровского спектра использовалась выборка из $L = 5$ отсчётов значений канальных коэффициентов, что существенно ограничивает число возможно разрешаемых кластеров. Это эмпирический выбор или есть какие-то теоретические обоснования?

Во второй главе диссертации автором разработан алгоритм предсказания канала. Однако не указывается, какова максимальная доплеровская частота, для которой предложенный алгоритм предсказания будет применим?

Отсутствуют сведения о внедрении результатов диссертации.

Замечания из отзыва официального оппонента Черноярова О.В.

В диссертационной работе все разработанные алгоритмы рассматриваются в применении к случаю одного пространственного канала пользователя. Неясно, почему не рассматривались случаи, когда пользователь имеет более одного пространственного канала?

В качестве одной из основных метрик эффективности предлагаемых алгоритмов автором предлагается «средняя скорость передачи данных базовой станцией». При этом не сделаны пояснения, почему была выбрана именно эта метрика, а, например, не такая общеупотребительная характеристика отношение сигнал/шум.

Замечания из отзыва официального оппонента Родионова А.А.

В первой главе диссертации алгоритм восстановления полной канальной матрицы тестиировался для случая, когда объединение антенных элементов решетки в цифровые порты осуществляется по столбцам. Не пояснено, почему не рассматривались другие конфигурации гибридных антенных решёток.

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.).

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.

Замечания из отзыва на автореферат Кейстовича А.В.

На листе 5 автореферата показано, что «Другим важным аспектом работы систем связи LTE и 5G NR в городских условиях является эффективное обслуживание высокомобильных пользователей. ... Характерный для них диапазон скоростей составляет 10 — 60 км/ч.» Однако на рис. 1 (лист 12) график зависимости значения метрики ρ_0 эффективности настройки диаграммы направленности антенной системы базовой станции от относительной скорости движения пользовательских приёмо-передающих станций резко обрывается на величине скорости 8 км/ч. Интересно, как поведет себя этот график в диапазоне скоростей от 10 до 60 км/ч?

На листе 12 автореферата показано, что «С увеличением взаимной относительной скорости приёмника и передатчика величина потерь существенно увеличивается и составляет около 3 дБ при скорости 8 км/ч. А какие будут потери в диапазоне скоростей (10-60) км/ч? Будет ли тогда эффективна система сотовой связи?

В материалах автореферата при сравнении полученных результатов приведены не конкретные цифры, а общие фразы: «...добраться более высокой точности предсказания ...» (лист 13), «...позволяет более эффективно и с более высокой точностью осуществлять оценку ...» (лист 14), «...существенно повысить достоверность информации о характеристиках канала оценку ...» (лист 14), «... демонстрирует более высокую точность прогнозирования оценку...» (лист 16), «...требует обработки существенно большего объёма данных оценку ...» (лист 16), «...не уступает известному алгоритму на основе автокорреляционного подхода, и превосходит его в диапазоне скоростей 15 -35км/ч ...» (лист 18), «... позволяя существенно снизить уровень потерь...» (лист 18), «...позволяет добиться точности представления канала близкого к случаю использования полностью цифровой антенной решётки...» (лист 19), «...позволило достичь улучшения эффективности алгоритма...» (лист 19), «...существенно превосходит по качеству предсказания параметрический алгоритм ...» (лист 19), что не позволяет оценить эффективность предложенных алгоритмов по сравнению с известными.

В автореферате не показано, как влияют на эффективность предложенных алгоритмов высота подъёма АР над поверхностью Земли и помехи от соседних базовых станций и других радиосредств.

Все работы соискателя опубликованы с соавторами, поэтому трудно оценить личный вклад автора в работу.

Замечания из отзыва на автореферат Милова В.Р.

Все публикации опубликованы в соавторстве, что требует аккуратного обоснования личного вклада соискателя;

В автореферате отсутствуют оценки времени, в течение которого используемое представление для канальных коэффициентов (8) остается адекватным.

Замечание из отзыва на автореферат Парфенова В.И

Одним из главных недостатков автореферата, на мой взгляд, является недостаточная проработанная методика сравнительного анализа полученных автором результатов с известными. Так, в автореферате либо вообще не приводятся сравнительные данные предлагаемых и известных алгоритмов, как в разделе 1, либо сравнение показывает приблизительно одинаковую эффективность предлагаемых и известных алгоритмов (см. рис.2 и 3, стр. 14, 18 и пр.). Основной упор при сравнении автор делает не на эффективность, а на сложность реализации известных алгоритмов по сравнению с предлагаемыми (при практически одинаковой их эффективности). Однако в этом случае необходимо приводить количественные результаты такого сравнения типа: насколько требуемый объем данных уменьшается по сравнению с известными алгоритмами (стр. 16); если вычислительные затраты невысоки в предлагаемых алгоритмах, то насколько (стр. 16); если утверждается, что практическая реализация предложенного алгоритма проще, чем существующих, то насколько (стр. 18) и т.д.

Замечания из отзыва на автореферат Серебрякова Г.В.

В автореферате в качестве метрики эффективности исследуемого алгоритма оценивания канальной матрицы выбрана метрика ρ (см. формулу 7). Однако при этом не пояснено, по какому статистическому ансамблю проводится усреднение.

При описании метода пространственной фильтрации в разделе 2.5 не поясняется, какой именно ортогональный базис используется для разложения канальной матрицы.

Замечания из отзыва на автореферат Тюрликова А.М.

На стр. 10 автореферата даётся краткое описание предложенного итеративного алгоритма восстановления полной канальной матрицы. При этом отмечается, что в «текущий момент времени t приходится использовать частично «устаревшие» значения коэффициентов». Далее говорится о алгоритмах предсказания этих коэффициентов, но в автореферате не описывается даже идея этих алгоритмов.

Из автореферата не понятно для каких конфигураций гибридных антенных решёток может быть применен итеративный алгоритм восстановления.

Замечание из отзыва на автореферат Хоров Е.М.

К недостатку автореферата можно отнести то, что в нём недостаточно полно представлены параметры системы связи, используемые при системном моделировании.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается значительным опытом выполнения ими научно-исследовательских работ по тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований установлено следующее.

Применение представленного в работе итеративного алгоритма восстановления полной канальной матрицы к системам с гибридными антенными решетками позволяет добиться точности представления канала, близкой к потенциальной верхней границе, которая достигается в случае использования полностью цифровой антенной решётки.

Разработанный параметрический подход к предсказанию канала на дробный шаг, основанный на гармоническом представлении зависимости канальных коэффициентов от времени, для скоростей движения пользователей (до 35 км/ч) превосходит метод прогнозирования на основе автокорреляционного подхода. При этом использование сверхразрешающих методов спектрального анализа для оценки параметров модели канальных коэффициентов позволяет использовать короткие выборки значений канальных коэффициентов, сохраняя высокую точность прогнозирования.

Сверхразрешающий корневой метод минимального многочлена, адаптированный для решения задач спектрального анализа, может быть применен для предсказания каналов высокомобильных пользователей современных систем связи. Параметрический алгоритм предсказания с корневым методом минимального многочлена 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 не требует применения дополнительных критериев для оценки числа гармонических сигналов в параметрической модели изменения канальных коэффициентов.

Высокую эффективность разработанных методов оценивания характеристик канала подтверждают результаты численного моделирования системы сотовой связи.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в диссертации разработан итеративный алгоритм восстановления канала в системах связи, использующих гибридные схемы формирования диаграмм направленности на базовых станциях и предложена его модификация для динамически меняющихся каналов с использованием методов предсказания. Разработан

параметрический алгоритм предсказания канальных коэффициентов высокомобильных пользователей на дробный шаг, основанный на полигармоническом представлении канальных коэффициентов и использовании методов сверхразрешения для оценки параметров модели. Осуществлено применение сверхразрешающего метода минимального многочлена для оценки параметров модели канальных коэффициентов, используемой в параметрическом алгоритме предсказания.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что созданные и представленные в диссертации высокоэффективные алгоритмы оценивания характеристик каналов мобильных пользователей могут быть использованы при совершенствовании современных и проектировании перспективных систем сотовой связи нового поколения.

Оценка достоверности полученных результатов исследования выявила, что изложенные в диссертационной работе результаты подтверждаются их согласием с результатами исследований других авторов в данной области, полученных для частных случаев, а также соответствием результатов аналитических расчетов и численного моделирования.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке задач, а также в построении аналитических моделей, выполнении теоретических расчетов, проведении численных экспериментов и обработке их данных, обсуждении и физической интерпретации полученных результатов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

- 1) Чем одно поколение мобильной связи отличается от другого? Какими параметрами они характеризуются? Насколько результаты, полученные в работе, применимы для оценки каналов нестационарных пользователей других поколений?
- 2) Когда Вы говорили про методы оценки канальной матрицы, Вы не упоминали априорную информацию. Вы строите параметрическую модель, а затем определяете её параметры. Необходима ли Вам какая-либо априорная информация, например, количество лучей в канале? Или же априорная информация не нужна?
- 3) В названии диссертации упоминаются системы сотовой связи 5-го поколения, но, если посмотреть формулировки выводов и положений, выносимых на защиту, нигде нет упоминания про системы связи 5-го поколения. Тогда остается непонятным, что же такого было сделано, что нужно именно для систем связи 5-го поколения. Создается впечатление, что все это можно сделать для систем связи разных поколений. Что здесь есть такого, без чего системы связи 5-го поколения никак не могли бы обойтись, из тех разработок, что Вы представили?

- 4) На 15 слайде Вы говорите, что в качестве несущей частоты используется 2,1 ГГц, где-то в диссертации написано 3,5 ГГц. Но частота 2,1 ГГц используется и в 4-м, и в 5-м поколениях, то есть это не уникальная характеристика. Гораздо перспективнее во всем мире частота 3,5 ГГц, про которую Вы пишите, но в России частота от 3,4 до 3,8 ГГц зарезервирована за военными спутниками связи. Например, спутниковая группировка их четырех геостационарных спутников «Благовест». Там в uplink 5,9 ГГц, а внизу как раз 3,4 - 4,2 ГГц. Недавно Мишустин говорил, что эта полоса зарезервирована. То есть в России для диапазона FR1 будет использоваться 4,4 ГГц, а для FR2 – 24 ГГц. Возникает вопрос по актуальности сделанного Вами исследования. То есть по отношения к нашей стране практическая значимость равна нулю? Для каких стран актуальны представленные разработки?
- 5) Содержание первых двух глав – это новые методы определения параметров моделей канала, причем особое внимание уделено именно подвижным пользователям. В этом есть какая-то особенность систем связи 5-го поколения? Какие особенности сигналов 5-го поколения здесь учтены? Или это универсальные алгоритмы, которые работают для любых сигналов?
- 6) Для систем 5-го поколения остро стоит вопрос работы системы, когда скорость пользователей растет. В работе вы рассматривали скорость 50 км/ч. Но на шоссе может быть и 100, и 150 км/ч. Для подобных значений скоростей данные алгоритмы будут работать?
- 7) Вы представили графики зависимости скорости передачи данных от скорости движения пользователей. Но на качество приема влияет также неоднородность сигнального поля. Например, при движении за угол здания даже на невысокой скорости случаются резкие изменения во времени. Факторы такого рода учитывались при моделировании?
- 8) Можно ли как-то подстраивать antennу, чтобы эффективно использовать многолучевость в канале?
- 9) Сеанс связи разделяется на оценку канала и затем передачу данных?

Соискатель Купцов В.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

- 1) Основные отличия поколений – это различные частотные диапазоны, несущие частоты, полосы частот, отводимые для передачи данных. Пилотные сигналы, которые используются для оценки канала, есть во всех поколениях систем связи. Они есть и в системах связи 6G. Разработанные алгоритмы могут быть применены к любым системам связи.
- 2) Предварительно для исследуемой модели канала проводился анализ доплеровского

- спектра и числа гармоник в этом спектре, которые соответствуют путям распространения. Но в целом для работы алгоритма это не важно, так как алгоритм определяет число гармоник в спектре сигнала. Эмпирически могут подбираться некоторые параметры. Так, например, оптимальная длина выборки равнялась 5. Но принципиально работа алгоритма от этого не меняется, и мы в любом случае оцениваем число гармоник и критически важное для нас число путей распространения.
- 3) Алгоритмы, которые я разрабатывал, тестировались на симуляторе системного уровня, который моделировал работу системы сотовой связи 5-го поколения, включая весь стек протоколов. То есть можно утверждать, что для систем 5-го поколения эти алгоритмы будут работать. При этом мне не хотелось ограничиваться в положениях, выносимых на защиту, только 5-м поколением. Так как данные алгоритмы могут быть применены и к существующим стандартам (3G, 4G), и к более новым.
 - 4) Все результаты, представленные здесь, получены в ходе выполнения проектов в интересах китайской компании. Эти диапазоны там лицензируются для систем сотовой связи. И я думаю, что немаловажным является то, что таким образом мы налаживаем международное научное сотрудничество.
 - 5) Да, можно сказать, что это особенность 5-го поколения. Одной из основных задач систем связи 5-го и последующих поколений является именно обеспечение связи подвижных пользователей. В общем случае, если в системе связи присутствует канал обратной связи, по которому передаются пилотные сигналы для оценки канала, то данные алгоритмы могут быть применены.
 - 6) Граница применимости данных алгоритмов упирается в теорему Котельникова. В тот момент, когда доплеровские частоты кластеров превосходят частоту следования пилотных сигналов, деленную на 2, эффективность алгоритмов нарушается. Однако в системах, поддерживающих передачу данных при движении пользователей на высоких скоростях, кратно уменьшается период следования пилотных сигналов. И разработанные алгоритмы могут быть применены и для случая более высоких скоростей движения пользователей.
 - 7) Да. Такие факторы учитывались в рамках статистически обоснованной модели канала. Геометрическое расположение пользователей также учтено в данной модели.
 - 8) Да можно. Например, в рамках режима Multi User MIMO, когда передача данных осуществляется за счет пространственного разделения сразу нескольким пользователям, что позволяет увеличить общую пропускную способность.
 - 9) Передача данных осуществляется постоянно по нисходящему каналу связи, а оценка производится за счет пилотов в восходящем канале.

На заседании 28.09.2022 г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития радиофизики присудить Купцову В.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени — 15, против присуждения ученой степени — нет, недействительных бюллетеней — 1.

Заместитель председателя
диссертационного совета



Ученый секретарь
диссертационного совета

Бакунов Михаил Иванович

Клюев Алексей Викторович

28.09.2022