

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Бегишева Вячеслава Олеговича «Методы анализа и расчета показателей качества высокочастотных сетей в условиях эффектов блокировки сигнала и микромобильности», представленную к защите на базе факультета физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов им. П. Лумумбы на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационное исследование Вячеслава Олеговича Бегишева на тему «Методы анализа и расчета показателей качества высокочастотных сетей в условиях блокировки сигнала и микромобильности» посвящено решению актуальных задач современной телекоммуникационной отрасли. С начала XXI века в этой области активно развиваются технологии высокочастотных сетей, включая 5G NR и будущие системы связи 6G, использующие миллиметровый диапазон длин волн и терагерцевый диапазоны частот, которые открывают новые возможности для приложений виртуальной и дополненной реальности, голографического телеприсутствия и тактильного интернета.

Однако передача информации в высокочастотных диапазонах сопряжена с рядом технических сложностей, включая блокировки сигнала малыми и средними объектами на пути прямой видимости распространения сигнала связи и эффекты микромобильности, возникающие из-за незначительных изменений положения пользовательских устройств. Эти проблемы существенно влияют на показатели качества связи, что требует разработки новых методов анализа и оценки эффективности сетей передачи информации.

В своей исследовательской работе Вячеслав Олегович решает научно-техническую задачу, связанную с разработкой методов анализа качества обслуживания в условиях блокировки сигнала и микромобильности. Проведенные исследования включают эмпирический анализ, разработку 3D-моделей для оценки блокировок, а также статистические методы моделирования

микромобильности. Полученные результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость, что подтверждается их применимостью в сценариях промышленного и городского развертывания сетей.

Таким образом, диссертационное исследование Бегишева Вячеслава Олеговича имеет высокую актуальность, так как направлена на решение задач, критически важных для внедрения и развития современных телекоммуникационных систем. Диссертация соответствует профилю специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» и вносит важный вклад в область исследований высокочастотных сетей связи.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 352 наименований и приложения. Во введении обоснована значимость темы исследования, определены цель и задачи, обозначены объект и предмет изучения, описаны научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов, а также основные положения, выдвигаемые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современных технологий высокочастотной связи 5G/6G. Рассматриваются ключевые особенности технологий, такие как применение высокочастотных диапазонов (mmWave, THz), методы формирования направленных лучей (beamforming), сетевой слайсинг. В разделе 1.1 приводится обзор основных услуг 5G. Раздел 1.2 описывает влияние факторов окружающей среды и динамических препятствий на работу сетей 5G в миллиметровом диапазоне длин волн. В разделе 1.3 исследуются возможности и ограничения терагерцевого диапазона частот в сетях связи 6G. Завершается глава выводами, обобщающими ключевые аспекты рассмотренных технологий.

Вторая глава посвящена разработке и изучению эмпирических моделей радиоканалов, учитывающих блокировку сигнала. Основное внимание уделено распространению радиоволн внутри помещений. В разделе 2.1 описаны методы проведения измерений на частоте 156 ГГц, включая анализ блокировки прямой видимости и алгоритмы их обнаружения. В разделе 2.2 рассматривается влияние отражений от строительных материалов, таких как стекло, гипсокартон и

газобетон, на характеристики сигнала. Представлены результаты статистического анализа и выводы, подтверждающие точность предложенных моделей.

Третья глава посвящена разработке моделей для оценки блокировки сигнала в различных условиях. В разделе 3.1 разработана модель для промышленных объектов с подвижными блокирующими элементами, используя методы фотограмметрии и стохастической геометрии. В разделе 3.2 предложена модель для анализа взаимодействия беспилотных летательных аппаратов с базовыми станциями в городской застройке, учитывающая высотные характеристики зданий. В разделе 3.3 рассматривается влияние атмосферных условий на качество связи между землёй и самолётом в терагерцевом диапазоне.

Четвёртая глава посвящена исследованию влияния микромобильности на качество связи в высокочастотных сетях. В разделе 4.1 представлен анализ характеристик движений пользователей и их влияние на уровень качества связи. Раздел 4.2 включает описание моделей микромобильности и оценку их точности с использованием экспериментальных данных. В разделе 4.3 описаны алгоритмы на основе датчиков движения, которые улучшают процесс поиска луча в условиях микромобильности. В разделе 4.4 рассматриваются методы машинного обучения для удалённого определения типов приложений на основе анализа поведения сигналов.

Пятая глава посвящена улучшению качества связи в городских сетях при высокой плотности пользователей. В разделе 5.1 исследуются подходы к применению технологии мультисвязности, которые позволяют повысить устойчивость соединения. В разделе 5.2 рассматриваются различные схемы управления ресурсами для сетей, работающих в диапазонах миллиметровых волн и sub-6 ГГц, учитывающие особенности различных типов трафика. В разделе 5.3 разрабатываются аналитическая модель сети, работающей одновременно в диапазонах миллиметровых волн и sub-6 ГГц, позволяющая оценивать вероятность блокировки сессий и на основе этого выбирать параметры сети.

Заключение содержит основные выводы исследования, включая описание новых моделей для анализа блокировки сигнала и микромобильности, а также методов повышения качества связи. Приведены рекомендации по применению результатов в реальных условиях.

Новизна исследования и полученных результатов

Диссертация содержит новые научные результаты, основные положения которых заключаются в следующем:

1. Разработаны методы моделирования блокировки путей распространения сигнала в высокочастотных сетях внутри помещений. Модели отличаются от известных тем, что позволяют учитывать отражения сигнала в помещениях с поверхностями, реализованными различными строительными материалами (глава 2).
2. Предложены методы идентификации блокировок пути прямой видимости, которые обеспечивают высокую вероятность их обнаружения вплоть до уровня 0,96–0,98 в течение всего 1–3 мс после возникновения блокировки. Методы основаны на статистическом анализе изменения уровня принимаемого сигнала для точного определения момента начала блокировки, а эффективность этих статистических методов и скорость реализации соответствующих алгоритмов является их отличительной особенностью (глава 2).
3. Предложены 3D-модели для оценки вероятности блокировки в промышленных сценариях развертывания сетей 5G NR при участии подвижных блокирующих роботизированных устройств. Эти модели отличаются от известных тем, что построены путем совместного применения методов фотограмметрии и стохастической геометрии (глава 3).
4. Предложены две модели оценки вероятности блокировки в сетях связи в сценариях применения летательных аппаратов. Отличительной особенностью является то, что первая модель учитывает геометрию зданий городской застройки, в то время как вторая модель учитывает геометрические и физические свойства типов атмосферных облаков при организации связи с участием летательных аппаратов (глава 3).
5. Предложена методология построения и анализа характеристик модели микромобильности для сетей связи 5G/6G. Отличительной особенностью

является возможность определения интервала времени между запусками поиска луча на БС в реальном времени. Отличием является также подтверждение достоверности результатов путем измерений на комплексе оборудования THz-диапазона частот. Методология включает удаленную идентификацию приложений на оконечных устройствах на основе методов машинного обучения (глава 4).

6. Для сценария мультисвязности в сети 5G NR разработаны модель и методы для повышения качества обслуживания мобильных абонентов (глава 5).
7. Для сценария мультисвязности между технологиями 5G NR на частотах, соответствующих mmWave-диапазону длин волн и диапазону суб-6 ГГц, предложены отличающиеся от известных аналитические модели и методы повышения характеристик обслуживания абонентов (глава 5).

Степень обоснованности научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждается применением таких методов исследований, как стохастическая геометрия, теория вероятностей, машинное обучение, а также натурное и имитационное моделирование.

Предложенные модели и методики имеют математическое обоснование, что подтверждается корректностью приведённых формул, соответствием теоретических предположений результатам экспериментов и высокой точностью численных расчётов. Например, в главе 2 представлены модели блокировки сигнала в сетях высокочастотного диапазона и методы их идентификации, которые демонстрируют точные результаты, согласующиеся с данными измерений на частотах терагерцевого диапазона.

Численные эксперименты, проведённые для анализа блокировок (глава 3) и микромобильности (глава 4), показали соответствие ранее установленным закономерностям, описанным в научной литературе, что подтверждает корректность предложенных подходов. Так, разработанные алгоритмы для идентификации блокировок и методы машинного обучения, используемые для оценки характеристик сетей 5G/6G, показали высокую адаптивность и

эффективность в разнотипных сценариях.

Дополнительным подтверждением достоверности результатов является их успешная апробация на международных и всероссийских научных конференциях, таких как IEEE Globecom, NEW2AN, DCCN и MoNeTec, а также публикация материалов в высокорейтинговых рецензируемых журналах, входящих в базы данных Scopus/WoS. Это свидетельствует о признании результатов в научной среде.

Практическая применимость рекомендаций доказана внедрением разработанных моделей и методов в рамках научно-исследовательских проектов, реализованных при поддержке грантов РНФ и НИР РУДН, а также тестированием на оборудовании терагерцевого диапазона. Эти результаты подчёркивают их значимость для современных сетей связи 5G/6G.

Ценность для науки и практики результатов работы

Научная ценность результатов работы заключается в разработке новых моделей и методов, позволяющих учитывать особенности высокочастотных сетей связи в условиях блокировки сигнала и микромобильности. Впервые предложены подходы к моделированию блокировок в терагерцевом и миллиметровом диапазонах длин волн с учётом динамических и статических препятствий, а также методов анализа микромобильности, влияющей на уровень сигнала связи. Эти результаты вносят значимый вклад в развитие теории телекоммуникационных систем, расширяя существующие концепции и подходы к оптимизации работы сетей 5G/6G.

Практическая ценность результатов заключается в их применимости для разработки и развертывания современных телекоммуникационных сетей. Разработанные алгоритмы идентификации блокировок и методы повышения качества связи могут быть использованы при проектировании высокочастотных сетей в условиях плотной городской застройки, на транспортных объектах и в промышленных зонах.

Кроме того, предложенные модели и методы нашли применение в рамках научно-исследовательских проектов, включая задачи, связанные с оптимизацией работы сетей на оборудовании терагерцевого диапазона. Практическое

использование данных решений позволяет улучшить эффективность сетей связи, повысить их надёжность и адаптивность к изменяющимся условиям, что особенно важно для внедрения таких технологий, как интеллектуальные транспортные системы, промышленные IoT- и беспилотные устройства.

Таким образом, результаты работы имеют высокую значимость как для дальнейшего развития научных исследований в области телекоммуникаций, так и для их применения в реальных инженерных и промышленных задачах.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертационного исследования подтверждены публикациями в ведущих научных изданиях и представлены на международных конференциях, что свидетельствует о признании их значимости научным сообществом. В рамках работы автором опубликовано 30 научных трудов, включая статьи в журналах из перечня ВАК, изданиях, индексируемых в базах данных Scopus/Web of Science, а также монографию и учебные пособия. Ряд разработанных моделей и методов получил подтверждение через регистрацию программ для электронных вычислительных машин.

Результаты исследования были представлены на крупных российских и международных конференциях, таких как IEEE Globecom, ACM MobiCom, DCCN, MoNeTec и NEW2AN, где они получили положительную оценку и вызвали интерес у специалистов в области телекоммуникаций. Кроме того, они обсуждались на научных семинарах Института компьютерных наук и телекоммуникаций РУДН имени П. Лумумбы и Института проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук.

Публикация результатов в высокорейтинговых изданиях, признанных международными базами данных, и их апробация на международных научных форумах показывает теоретическую ценность и практическую значимость работы. Это также подтверждает их актуальность и соответствие современным задачам и направлениям развития телекоммуникационных технологий.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям, изложенным в диссертации. В автореферате кратко и чётко представлены ключевые результаты исследования, включая разработанные модели и методы, а также их научная новизна и практическая ценность. Основные аспекты диссертационной работы, такие как анализ блокировки сигнала в высокочастотных сетях, влияние микромобильности на качество связи и методы повышения показателей качества обслуживания сетей 5G/6G, изложены в доступной форме.

Автореферат отражает структуру диссертации, охватывая постановку цели и задач исследования, описание используемых методов и подходов, а также основные выводы и рекомендации. Приведённые в автореферате данные согласуются с результатами, представленными в тексте диссертации, и подтверждаются экспериментами, численными расчётами и публикациями в рецензируемых изданиях.

Таким образом, автореферат точно передаёт содержание, научную направленность и значимость диссертационного исследования, обеспечивая читателю целостное представление о проделанной работе и её результатах.

Замечания по диссертационной работе

1. Не совсем корректно сформулированы положения, выносимые на защиту. В частности, в положениях 1 и 7 говорится о повышении вероятности идентификации и о снижении скорости обслуживания, но не указано по сравнению с чем.
2. Автореферат полностью вошел во введение диссертации, включая краткое содержание ее глав, что является избыточным и обычно не делается.
3. Обычно в первой главе диссертации представлено последовательное описание объекта исследования и обзор литературы, на основании которого логически формулируется раздел с постановкой задач. Однако в диссертации каждая из четырёх глав включает собственный обзор, что, с одной стороны, демонстрирует глубину проработки отдельных аспектов, но, с другой

стороны, может создавать впечатление фрагментарности работы. Чем мотивирован такой выбор?

4. Из обзора литературы, сделанного в главе 2, не сделано явного вывода о имеющихся пробелах в данной тематике и не поставлены в явном виде решаемые задачи.
5. Зачастую диссертант путает понятия «модель» и «сценарий». Например, разделы 3.1.1-3.1.3 и 4.2.1 описывают сценарии, режимы работы, но не модели, как указано в их названиях.
6. В разделе 3.2.4 не приведены детали имитационного моделирования: среда моделирования, используемые допущения, отличия от аналитической модели.
7. В разделе 4.1.5 говорится, что на рис.4.14 показаны функции распределения занятости зон покрытия, однако по оси X стоит номер ячейки. Как такое может быть?
8. В разделе 5.2.3 обсуждаются численные результаты разработанной модели. Неясно, какая модель имеется в виду. Раздел 5.2 не содержит формул, а модель из раздела 5.1 не учитывает совместного использования разных диапазонов.
9. Результаты 3 и 4 в выводах к главе 5 требуют пояснения.
10. Диссертация изобилует стилистическими ошибками, сильно затрудняющими чтение и понимание. Вероятно, это связано с применением автоматического перевода на русский.

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

Заключение по работе

Диссертационное исследование Бегишева Вячеслава Олеговича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы повышения качества передачи данных в условиях блокировки сигнала и микромобильности, имеющей важное значение для разработки эффективных методик проектирования и развертывания высокочастотных сетей связи. Работа соответствует требованиям,

предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, согласно п. 2.1 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а её автор, Бегишев Вячеслав Олегович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Официальный оппонент, доктор технических наук (05.12.13 – Системы сети и устройства телекоммуникаций), заведующий лабораторией № 18 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук, профессор

« 6 » марта 2025 г.

Ляхов Андрей Игоревич



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук,

Адрес: 127051, Большой Каретный пер., д.19 стр. 1, Москва.

Тел: +7 (495) 650-42-25.

Факс: +7 (495) 650-05-79.

E-mail: director@iitp.ru

Страница в интернете: <http://iitp.ru/>