

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

Тематика диссертационной работы Бегишева Вячеслава Олеговича «Методы анализа и расчета показателей качества высокочастотных сетей в условиях эффектов блокировки сигнала и микромобильности» посвящена решению одной из сложных научных проблем в области телекоммуникационных технологий, возникшей в последние годы. Развитие мобильных сетей 5-го и 6-го поколений (5G и 6G) ведет к применению высокочастотных технологий для миллиметрового диапазона длин волн (mmWave) и терагерцевого (THz) диапазона частот, что становится основой для обеспечения высокоскоростной связи и реализации таких современных приложений, как дополненная и виртуальная реальность, голографическое телеприсутствие и тактильный интернет.

Однако использование этих диапазонов затруднено такими эффектами, как блокировка сигнала препятствиями на пути прямой видимости и микромобильность абонентского устройства. Они значительно усложняют работу беспроводных сетей в реальных условиях. Эти эффекты могут приводить к снижению качества связи, что требует проведения их тщательного анализа и разработки методов, направленных на обеспечение качества в таких условиях.

Диссертационная работа направлена на разработку методов анализа и расчета показателей качества в условиях эффектов блокировки и микромобильности, что является важной и практически востребованной

задачей для развития современных высокочастотных сетей. Поэтому тема диссертации является актуальной. Она полностью соответствует специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 352 наименований и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проводится обзор перспективных сетей связи 5G/6G. Рассмотрены ключевые технические особенности и возможности сетей 5G, включая частотные диапазоны, технологии MIMO, слайсинга и формирования луча. Описаны базовые услуги и принципы работы сетей 5G. Обсуждаются особенности сетей 5G в диапазоне mmWave, включая влияние погодных условий и динамическую блокировку. Представлены терагерцевые сети доступа 6G, рассмотрены их преимущества и ограничения.

Глава 2 посвящена разработке и анализу эмпирических моделей радиоканала в условиях блокировки сигнала. Основное внимание уделено поведению радиоволн в условиях помещений. Описаны методы проведения натурных измерений и алгоритмы идентификации блокировок, рассмотрено влияние отражений на характеристики сигнала, проведён анализ отражающих поверхностей, таких как стекло и гипсокартон.

Глава 3 посвящена аналитическим моделям блокировки сигнала в различных сценариях. Разработана модель для промышленных зон, учитывающая подвижные блокирующие объекты. Предложена модель взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с базовыми станциями в городской застройке. Рассмотрены сценарии блокировки в системах связи «самолёт–земля», включая влияние атмосферных условий.

Представлены численные результаты, подтверждающие достоверность предложенных моделей.

Глава 4 рассматривает влияние микромобильности на качество связи в сетях mmWave и THz диапазонов. Представлены результаты статистического анализа микромобильности. Предложены методы оценки точности моделей микромобильности и численные исследования. Обсуждаются датчики движения для улучшения поиска луча в условиях микромобильности. Описаны алгоритмы машинного обучения для удалённой идентификации приложений.

Глава 5 посвящена улучшению качества обслуживания в сложных сценариях городских развертываний высокочастотных сетей. Рассмотрена технология мультисвязности в системах связи. Представлены модели резервирования ресурсов, учитывающие особенности mmWave и sub-6 ГГц диапазонов. Проведён анализ эффективности систем связи в условиях высокой плотности трафика. Глава завершается выводами, содержащими рекомендации по оптимизации сетей связи.

В заключении сформулированы основные результаты работы, включая разработку новых моделей блокировки сигнала и микромобильности, а также методы повышения качества обслуживания в сетях 5G+/6G. Приведены рекомендации по применению результатов в реальных сценариях и направления дальнейших исследований.

Приложение содержит документы, подтверждающие внедрение результатов диссертации.

Новизна исследования и полученных результатов

Диссертация содержит новые научные результаты, основные из 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, сделанными из разных строительных материалов (глава 2).

2. Предложены методы идентификации блокировок пути прямой видимости, обеспечивающие высокую вероятность их обнаружения (до 0,96–0,98) в течение всего 1–3 мс после возникновения блокировки. Для точного определения момента начала блокировки применен статистический анализ изменения уровня принимаемого сигнала. Отличительными особенностями являются эффективность этих методов и скорость реализации соответствующих алгоритмов (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 основаны на совместном применении методов фотограмметрии и стохастической геометрии (глава 3).

4. Предложены две модели оценки вероятности блокировки в сетях связи в сценариях применения летательных аппаратов. Отличительными особенностями является учет геометрии зданий городской застройки в первой модели, и учет геометрических и физических свойств типов атмосферных облаков при организации связи с участием летательных аппаратов во второй модели (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 базовой станции в реальном времени. Достоверность результатов подтверждена измерениями на комплексе оборудования THz-диапазона. Методология включает также удаленную идентификацию приложений на оконечных устройствах методами машинного обучения (глава 4).

6. Для сценария мультисвязности в сети 5G NR разработаны модель и методы для повышения качества обслуживания абонентов в условиях применения колесных устройств (глава 5).

7. Для сценария мультисвязности между технологиями 5G NR на частотах, соответствующих диапазонам mmWave и суб-6 ГГц, предложены новые модели и методы повышения качества обслуживания абонентов (глава 5).

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

Обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертации, подтверждается корректным применением методов стохастической геометрии, теории вероятностей, машинного обучения, а также натурным и имитационным моделированием.

Разработанные модели и методы детально обоснованы, что подтверждается корректностью представленных математических формул, согласованностью теоретических и экспериментальных результатов, а также численными исследованиями. Например, высокая точности модели блокировки сигнала в высокочастотных сетях и методов их идентификации (глава 2) подтверждается экспериментальными данными, полученными на частотах THz-диапазона. Результаты численных экспериментов для моделей блокировки (глава 3) и микромобильности (глава 4) согласуются с ранее описанными в литературе закономерностями, что также подтверждает обоснованность предложенных подходов.

Достоверность результатов дополнительно подтверждена апробацией на ведущих международных и всероссийских конференциях, включая IEEE Globecom, NEW2AN и MoNeTec, а также публикациями в рецензируемых научных журналах, входящих в базы данных Scopus и WoS. Это свидетельствует о признании изложенных в диссертации результатов в научном сообществе.

Ценность для науки и практики результатов работы

Ценность теоретических результатов диссертации заключается в разработке новых математических моделей и методов для анализа и оптимизации высокочастотных сетей связи 5G/6G. В частности, предложенные

модели блокировки сигнала и микромобильности позволяют учесть влияние динамических факторов, таких как движение пользователей и препятствия в городской и индустриальной среде. Эти результаты расширяют теоретические основы сетевых технологий, применяемых в миллиметровом диапазоне длин волн и терагерцевом диапазоне частот.

Апробация полученных результатов на ведущих научных конференциях и их публикация в журналах, входящих в международные базы Scopus/WoS, свидетельствуют об их признании и значимости для научного сообщества.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования предложенных методов и моделей проектными организациями и операторами связи для планирования сетей 5G/6G в условиях плотной городской застройки и сложных индустриальных сценариев; оптимизации распределения радиоресурсов с учётом мультисвязности и резервирования; повышения качества обслуживания в сетях связи с интенсивным использованием потокового и эластичного трафика.

Результаты работы внедрены в научно-исследовательские проекты, выполненные по грантам РНФ и других организаций, что подтверждено документами, приведенными в приложении. В частности, результаты имитационного моделирования, представленные в диссертации, использованы для оптимизации работы сетей связи на оборудовании THz-диапазона, что показывает возможность их применимости в сетях 5G/6G. Таким образом, диссертация не только вносит вклад в теоретические исследования, но и имеет прикладное значение для современных сетей связи.

Кроме того, результаты диссертации используются в учебных процессах в СПбГУТ и РУДН.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации изложены в 30 работах. Из них 3 опубликованы в журналах из перечня ВАК (квартили K1 и K2); 18 – в изданиях,

индексируемых в международных базах цитирования Scopus (квартили Q1-Q3) и WoS (квартили Q1-Q3); 1 монография; 2 учебных пособия; 6 зарегистрированных программ для ЭВМ.

Научные достижения, представленные в диссертации, были апробированы на ведущих международных и всероссийских конференциях, включая IEEE Globecom, NEW2AN, ACM MobiCom, DCCN и MoNeTec.

Содержание публикаций охватывает все ключевые аспекты исследования: разработка моделей блокировки сигналов и микромобильности в сетях 5G и 6G, методы статистического анализа для идентификации блокировок, алгоритмы машинного обучения для классификации приложений, а также численные исследования и результаты натурных экспериментов, направленные на анализ характеристик высокочастотных сетей.

Таким образом, опубликованные материалы подтверждают высокую степень научной новизны, теоретической проработки и практической значимости полученных результатов.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям и результатам, представленным в диссертации. В автореферате чётко отражены актуальность темы исследования, цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

Таким образом, автореферат корректно и в достаточной мере отражает содержание диссертации, сохраняя логическую структуру и акцентируя внимание на её наиболее важных положениях.

Замечания по диссертационной работе

1. Диссертация посвящена анализу и расчету показателей качества, однако в ней в явном виде не указано, какие именно показатели качества рассматриваются и как на них влияют анализируемые характеристики.

2. Формулы (1.1)–(1.10), (5.1), (5.24) приведены без ссылок на источники.
 3. В разделе 4.4 при использовании алгоритмов машинного обучения для идентификации приложений отсутствует обоснование выбора трех рассмотренных типов таких алгоритмов, не указаны ограничения возможности их использования и вычислительные ресурсы, требуемые для их реализации. Добавление этого анализа позволило бы более объективно оценить применимость предложенных моделей в реальных условиях.
 4. Объем диссертации (почти 300 страниц основного текста) представляется чрезмерным. Его стоило бы сократить, устранив некоторые повторы и перенеся менее важный материал в приложения.
 5. Есть замечания редакционного характера: в диссертации есть опечатки, пропущенные слова (на с. 122, 229, 270 и др.); таблицы 2.1 и 2.2, а также 5.1, 5.2 и 5.3 имеют одинаковые заголовки; буква E означает математическое ожидание, но так же обозначена и некоторая вероятность (с. 64).
 6. В автореферате стоило бы более подробно написать об использовании результатов диссертации.
 7. В автореферате в списке работ диссертанта его фамилия везде дана в начале описания публикации, однако по стандарту в начале библиографического описания должна стоять фамилия первого автора.
- Однако сделанные замечания не снижают ценность результатов диссертационной работы и не препятствуют ее положительной оценке.

Заключение по работе

Диссертационное исследование Бегишева Вячеслава Олеговича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы разработки методов анализа и расчёта показателей качества обслуживания в высокочастотных сетях связи в условиях блокировки сигнала и микромобильности, имеющей важное значение для развития и оптимизации современных телекоммуникационных систем и повышения их качества обслуживания. 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 (05.13.01 – Управление в технических системах), профессор кафедры «Сети связи и системы коммутации» Ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики», старший научный сотрудник

 Нетес Виктор Александрович

«04» марта 2025 г.

Подпись Нетеса В.А. удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета МТУСИ  /Т.В. Зотова/

«04» марта 2025 г.



Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики».

Адрес: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А

Тел: +7 (495) 957-77-31.

Факс: +7 (495) 925-04-35.

E-mail: mtuci@mtuci.ru

Страница в интернете: <https://mtuci.ru/>