

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 актуальных и сложных научных проблем, возникших в области телекоммуникационных технологий в последние годы. С развитием сетей пятого и шестого поколений применение высокочастотных технологий на миллиметровом диапазоне длин волн и терагерцевом диапазоне частот, становится основой для обеспечения высокоскоростной связи и реализации современных приложений, таких как дополненная и виртуальная реальность, голографическое телеприсутствие и тактильный интернет.

Однако использование высокочастотных диапазонов связано с рядом специфических проблем, таких как блокировки сигнала, вызванные препятствиями на пути прямой видимости, и микромобильность, что значительно усложняет стабильную работу беспроводных сетей в реальных условиях. Эти эффекты могут привести к потере качества связи, что требует проведения детализированного анализа и разработки методов, направленных на оптимизацию показателей качества связи в таких условиях.

Диссертационная работа Бегишева Вячеслава Олеговича направлена на разработку методов анализа и расчета показателей качества в условиях эффектов блокировки и микромобильности, что является важной и практически востребованной задачей для развития высокочастотных сетей. Учитывая

актуальность проблемы обеспечения стабильности и качества связи в условиях блокировок и микромобильности, тема диссертации является несомненно актуальной и необходимой для дальнейших исследований в области высокочастотных телекоммуникационных технологий и соответствует специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 352 наименований и приложений. 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 первой главе проводится обзор современных сетей связи 5G/6G. Рассмотрены ключевые технические особенности и возможности сетей 5G, включая частотные диапазоны, технологию MIMO, сетевой слайсинг и beamforming. В разделе 1.1 описаны базовые услуги и принципы работы сетей 5G, включая eMBB, URLLC и mMTC. В разделе 1.2 обсуждаются особенности сетей 5G в миллиметровом диапазоне длин волн, включая влияние погодных условий и динамическую блокировку. В разделе 1.3 представлены терагерцевые сети доступа 6G, рассмотрены их преимущества и ограничения. Глава завершается выводами, обобщающими ключевые аспекты рассмотренных технологий.

Вторая глава посвящена разработке и анализу эмпирических моделей радиоканала в условиях блокировки сигнала. Основное внимание уделено поведению радиоволн в условиях помещений. В разделе 2.1 описаны методы проведения натурных измерений и алгоритмы идентификации блокировок. В разделе 2.2 рассмотрено влияние отражений на характеристики сигнала. Проведён анализ отражающих поверхностей, таких как стекло и гипсокартон. Глава завершается выводами, в которых обобщены результаты численных исследований и натурных экспериментов.

Третья глава посвящена аналитическим моделям блокировки сигнала в различных сценариях. В разделе 3.1 разработана модель для промышленных зон,

учитывающая подвижные блокирующие объекты. В разделе 3.2 предложена модель взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с базовыми станциями в городской застройке. В разделе 3.3 рассмотрены сценарии блокировки в системах связи «самолёт–земля», включая влияние атмосферных условий. В каждом разделе представлены численные результаты, подтверждающие достоверность предложенных моделей.

Четвёртая глава рассматривает влияние микромобильности на качество связи в сетях mmWave и THz диапазонов частот. В разделе 4.1 представлены результаты статистического анализа микромобильности пользователей. В разделе 4.2 предложены методы оценки точности моделей микромобильности и численные исследования. В разделе 4.3 обсуждаются датчики движения для улучшения поиска луча в условиях микромобильности. В разделе 4.4 описаны алгоритмы машинного обучения для удалённой идентификации приложений.

Пятая глава посвящена улучшению качества обслуживания в сложных сценариях городских развертываний высокочастотных сетей. В разделе 5.1 рассмотрены аспекты мультисвязности в системах связи. В разделе 5.2 представлены модели резервирования ресурсов, учитывающие особенности mmWave и sub-6 ГГц диапазонов. В разделе 5.3 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 для дальнейших исследований.

Приложения содержат документы, подтверждающие внедрение результатов исследования.

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 абонентов в условиях применения колесных устройств (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 модели и методы повышения характеристик обслуживания абонентов (глава 5).

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

Степень обоснованности научных положений и выводов, представленных в диссертации, подтверждается использованием проверенных методов анализа, таких как стохастическая геометрия, теория вероятностей, методы машинного обучения, а также натурное и имитационное моделирование.

Разработанные модели и методы детально обоснованы математически, что подтверждается корректностью представленных формул, согласованностью теоретических предположений с результатами экспериментов, а также достоверностью численных исследований. Например, модели блокировки сигнала в высокочастотных сетях и методы их идентификации, представленные в главе 2, демонстрируют высокую степень точности, что подтверждается экспериментальными данными, полученными на частотах THz-диапазона.

Результаты численных экспериментов для моделей блокировки (глава 3) и микромобильности (глава 4) согласуются с известными в литературе закономерностями, что дополнительно подтверждает обоснованность предложенных подходов. Например, предложенные алгоритмы идентификации блокировок и методы машинного обучения для оценки характеристик сетей 5G/6G показали высокую эффективность и способность адаптироваться к различным сценариям.

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.

Практическая значимость рекомендаций подтверждается внедрением разработанных моделей и методов в рамках научно-исследовательских проектов, выполненных по грантам РНФ и НИР РУДН, а также их апробацией на реальном оборудовании THz-диапазона частот.

Ценность для науки и практики результатов работы

Значимость 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 движения пользователей и блокирующих объектов в городской и индустриальной среде. Эти результаты расширяют теоретические основы сетевых технологий, применяемых в миллиметровом диапазоне длин волн и терагерцевом диапазоне частот.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения 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 (QoS) в сетях связи с интенсивным использованием потокового и эластичного трафика.

Результаты работы внедрены в научно-исследовательские проекты, выполненные по грантам Российского научного фонда (РНФ) и других организаций. В частности, результаты имитационного моделирования, представленные в диссертации, использованы для оптимизации работы сетей связи на оборудовании THz-диапазона, что подтверждено документально в приложениях.

Таким образом, диссертация не только вносит вклад в фундаментальные исследования в области телекоммуникаций, но и имеет непосредственное прикладное значение для современных сетей связи.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации изложены в 30 работах, из них 3 работы опубликованы в журналах из списка ВАК (квартили K1 и K2); 18 статей в международных базах цитирования Scopus (квартили Q1-Q3) и WoS (квартили Q1-Q3); 6 зарегистрированных программ для ЭВМ, а также 1 монография и 2 учебных пособия.

Научные достижения, представленные в диссертации, апробированы на ведущих международных и всероссийских конференциях: IEEE Globecom, NEW2AN, ACM MobiCom, DCCN и MoNeTec. Это свидетельствует о значимости и актуальности выполненной работы для международного научного сообщества.

Содержание публикаций охватывает ключевые вопросы исследования, такие как разработка моделей блокировки сигналов и микромобильности в сетях 5G/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 и практической значимости полученных результатов, полностью соответствуя современным требованиям к исследованиям в области телекоммуникаций.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям и результатам, представленным в диссертационной работе. В автореферате чётко отражены актуальность темы исследования, цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также основные результаты, выносимые на защиту.

Ключевые положения диссертации, включая разработанные математические модели блокировки сигналов и микромобильности в сетях 5G/6G, методы идентификации блокировок, алгоритмы машинного обучения и результаты

численных исследований, изложены в автореферате в структурированной форме. Это обеспечивает полное представление о содержании диссертационного исследования и его научной значимости.

Таким образом, автореферат корректно и в достаточной мере отражает содержание диссертации, сохраняя логическую структуру.

Замечания по диссертационной работе

1. В разделе 2.1 второй главы (стр. 46–66) и разделе 3.2 третьей главы (стр. 119–127) текст содержит много технических деталей, что затрудняет восприятие основной идеи. В этих разделах представлено множество специфических формул, которые могут быть сложными для восприятия читателями, не знакомыми с узкоспециализированными аспектами. Следовало бы упростить эти части текста, сделав акцент на ключевых выводах и концепциях, а более детализированные вычисления и технические подробности вынести в приложения или уточнить их в контексте практического применения. Это улучшило бы общую доступность и ясность изложения для широкой аудитории.
2. В разделе 2.3 второй главы (стр. 50–55), где представлены предложенные модели для анализа блокировки сигнала, отсутствует информация о том, как эти модели ведут себя в условиях изменения ключевых параметров, таких как увеличение плотности пользователей или изменение характеристик радиоканала (например, в случае динамических изменений в трафике или внешних факторов). Рекомендуется дополнить этот раздел оценкой адаптивности моделей, например, через анализ их устойчивости к изменениям в плотности сети или изменяющимся условиям радиоканала, чтобы продемонстрировать, насколько предложенные методы могут быть эффективно применены в реальных, изменяющихся условиях эксплуатации.
3. В разделе 4.1 четвёртой главы (стр. 156–159) представлен эффект микромобильности, который требует дополнительных пояснений и примеров. Важно более подробно объяснить, что подразумевается под микромобильностью, а также привести примеры её применения в реальных сценариях (например, влияние на качество связи в условиях перемещения

пользователей с мобильными устройствами в городских или промышленных зонах).

4. В разделе 4.4 четвёртой главы (стр. 220–227), где рассматриваются алгоритмы машинного обучения для анализа характеристик сетей, отсутствует достаточно детальное сравнение предложенных методов с существующими решениями. Например, не приведено конкретное сравнение предложенных моделей с текущими подходами с точки зрения их точности, скорости вычислений или области применения. Рекомендуется дополнить этот раздел анализом преимуществ предложенных методов по сравнению с аналогичными моделями, представленными в литературе, с указанием, как они превосходят существующие подходы по ключевым метрикам, таким как точность прогнозов, вычислительные затраты в разных сценариях. Это усилит научную значимость работы и позволит более чётко продемонстрировать её вклад в область телекоммуникаций.
5. Некоторые формулы в тексте не содержат пояснений всех переменных. Это затрудняет их понимание для читателя, не знакомого с контекстом.

Отмеченные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на её положительную оценку.

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, имеющей важное значение для повышения эффективности функционирования беспроводных систем в условиях динамически изменяющейся среды. 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), доцент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук



Барабанова Елизавета Александровна

«21» декабря 2025 г.

Подпись

Барабанова

ЗАВЕРЯЮ

Вед. инженер
Гордеева Ю. Ю.

Гордеева



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук,

Адрес: 117997, г. Москва, Профсоюзная, 65.

Тел: +7 (495) 334-89-10.

Факс: +7 499 234-64-26.

E-mail: dan@ipu.ru

Страница в интернете: <https://www.ipu.ru/>