# 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

Диссертационная работа Вячеслава Олеговича Бегишева «Методы анализа и расчета показателей качества высокочастотных сетей в условиях блокировки сигнала и микромобильности» посвящена решению важных проблем, возникающих при развитии современных телекоммуникационных технологий. Развитие технологий 5G и ориентир на следующую эволюцию беспроводных сетей 6G – подразумевают повышение рабочей частоты в сети радиодоступа, что потенциально позволяет увеличить полосу пропускания канала и существенно увеличить пропускную способность сетей, что обеспечивает поддержку новейших цифровых приложений, таких как взаимодействие в дополненной реальности, передача данных с минимальными задержками и новые виды мультимедийных услуг.

Повышение рабочей частоты сети доступа открывают широкие возможности, однако и сталкивается с существенными техническими трудностями. В частности, проблемы блокировки сигнала объектами в зоне прямой видимости и микромобильности, вызывающей нарушение выравнивания антенн, оказывают значительное влияние на стабильность и качество связи. Указанные проблемы наиболее заметны в условиях плотной городской застройки, промышленных объектов и воздушного пространства, что делает необходимым проведение дополнительных исследований для разработки эффективных решений, обеспечивающих качество связи.

Диссертационная работа направлена на разработку новых методов моделирования, анализа и расчета показателей качества высокочастотных сетей доступа, что позволит повысить их надежность и эффективность. Исследования в

этой области необходимы для успешного развертывания технологий нового поколения, способных удовлетворить растущие требования пользователей и обеспечить поддержку передовых приложений.

Таким образом, тема диссертационного исследования имеет высокую актуальность, отражает современные научно-технические задачи и полностью соответствует профилю специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций».

**Содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 352 источников и приложения.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, описаны объект и предмет работы, а также научная новизна и практическая значимость. Также во введении описаны методы и методология, которые использовались для получения результатов.

Глава 1, посвященная анализу современных технологий высокочастотных сетей связи, состоит из двух подразделов. В первом подразделе рассматриваются особенности сетей 5G и их переход к технологии 6G, включая использование миллиметрового диапазона длин волн. Во втором анализируются проблемы блокировки сигнала и микромобильности, а также их влияние на уровень качества связи.

Глава 2 охватывает методы анализа блокировки сигнала в высокочастотных сетях и состоит из трех подразделов. Первый подраздел посвящен экспериментам по исследованию блокировок в зоне прямой видимости в помещениях и разработке моделей отражений сигнала. Во втором подразделе описаны алгоритмы идентификации блокировок с использованием статистических методов, а в третьем проводится оценка эффективности предложенных методов на основе реальных данных.

Глава 3, посвященная моделям вероятности блокировки в промышленных и городских сценариях, включает три подраздела. В первом представлены 3D-модели для анализа блокировок в промышленных условиях. Во втором исследуется взаимодействие между беспилотными летательными аппаратами и

базовыми станциями в городской застройке. Третий подраздел затрагивает влияние атмосферных условий на блокировку сигнала.

Глава 4 описывает методологию анализа эффекта микромобильности и состоит из четырех подразделов. В первом изложены разработки статистических моделей микромобильности, во втором – их влияние на стабильность связи в сетях 5G/6G. Третий подраздел посвящен методам улучшения поиска антенн в условиях микромобильности, а четвертый – применению машинного обучения для идентификации приложений на оконечных устройствах.

Глава 5 рассматривает методы повышения качества обслуживания в высокочастотных сетях и включает три подраздела. В первом разрабатываются модели мультисвязности для улучшения характеристик обслуживания подвижных устройств. Второй подраздел посвящен особенностям обслуживания эластичного и потокового трафика в условиях мультисвязности. В третьем предложены методы совместного использования сетей суб-6 ГГц и mmWave диапазонов.

В заключении подводятся итоги исследования, формулируются основные выводы, даются рекомендации по практическому применению разработанных методов и моделей, а также определяются направления для дальнейших исследований.

Список литературы включает 352 источника, включая как работы, использованные для анализа, так и публикации автора.

Приложения содержат документы, подтверждающие внедрение результатов исследований.

**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, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается использованием современных подходов, математических методов и практической апробации.

Научные положения опираются на строгие методы анализа, включая статистическое моделирование, теорию вероятностей, машинное обучение, а также натурные и имитационные эксперименты. Разработанные модели и методики подробно обоснованы математически, что подтверждается точностью формул, согласованностью теоретических предположений с результатами экспериментов и достоверностью численных расчетов.

Результаты экспериментов, представленные в работе, демонстрируют высокую точность, что подтверждается тестированием моделей в условиях, приближенных к реальным сценариям работы высокочастотных сетей. Например, модели блокировки сигнала и алгоритмы их идентификации, изложенные в главе 2, показали эффективность и соответствие экспериментальным данным.

Выводы и рекомендации основаны на согласованности полученных данных с известными научными закономерностями. Например, результаты анализа микромобильности (глава 4) и разработки методов повышения качества обслуживания (глава 5) подтверждают свою обоснованность через сопоставление с практическими результатами и публикациями других исследователей.

Достоверность научных результатов подтверждается их представлением на международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах, включенных в базы Scopus/WoS. Признание в научном сообществе свидетельствует о высоком уровне выполненной работы.

Практическая значимость рекомендаций подтверждается их внедрением в

рамках научно-исследовательских проектов и апробацией на реальном оборудовании. Это обеспечивает возможность применения разработанных моделей и методов в современных и перспективных сетях связи 5G/6G, демонстрируя их актуальность и надежность.

**Ценность для науки и практики результатов работы**

Результаты диссертационной работы имеют значимую ценность как для науки, так и для практики, предлагая новый подход к решению актуальных задач в области высокочастотных сетей связи. Научная значимость работы заключается в развитии теоретических основ анализа и моделирования высокочастотных систем, включая блокировку сигнала, микромобильность и технологию мультисвязности. Предложенные модели и алгоритмы не только углубляют понимание процессов, происходящих в сетях 5G/6G, но и предлагают современные подходы к их изучению. Применение машинного обучения для оптимизации работы сетей и прогнозирования их характеристик создает новые перспективы для дальнейших исследований в этой области.

Практическая ценность работы заключается в возможности применения разработанных моделей и методов для оптимизации работы сетей связи, включая повышение их производительности, устойчивости и качества обслуживания. Представленные решения подходят для внедрения в реальных условиях, что подтверждается их апробацией на реальном оборудовании и в рамках научно-исследовательских проектов. Разработанные рекомендации могут быть использованы при проектировании и эксплуатации современных сетей 5G, а также при создании будущих сетей 6G, что делает их актуальными для телекоммуникационной отрасли.

Таким образом, результаты работы создают основу для дальнейшего развития науки в области высокочастотных сетей и предлагают эффективные инструменты для решения практических задач, направленных на улучшение качества и надежности современных телекоммуникационных систем.

**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 К1 и К2); 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.

В работах, представленных в печати, подробно освещены теоретические и экспериментальные этапы исследования, включая разработанные модели блокировки сигнала, методы анализа микромобильности и предложенные алгоритмы повышения качества обслуживания в высокочастотных сетях. Публикации охватывают как фундаментальные аспекты, так и практическую направленность, что делает их полезными для широкого круга исследователей и инженеров.

Результаты также были представлены на ведущих международных конференциях, таких как IEEE Globecom, DCCN, NEW2AN и MoNeTec, где получили положительные отзывы и обсуждение в профессиональной среде. Эти выступления подтвердили актуальность и значимость предложенных подходов, а также способствовали их интеграции в глобальное научное сообщество.

Таким образом, публикации и апробации основных результатов диссертации являются свидетельством их научной обоснованности, актуальности и востребованности в области исследований современных и перспективных сетей связи.

**Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям, представленным в диссертационной работе. В автореферате отражены ключевые аспекты исследования, включая актуальность темы, цели и задачи работы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость полученных результатов.

Основные положения диссертации, такие как разработка математических моделей блокировки сигнала, анализ микромобильности, методы повышения

качества обслуживания, а также алгоритмы машинного обучения для оптимизации работы высокочастотных сетей, изложены в автореферате в краткой и доступной форме. Это позволяет получить целостное представление о проделанной работе и достигнутых результатах.

В автореферате представлены наиболее значимые теоретические и экспериментальные выводы, подтвержденные результатами натурных и имитационных экспериментов, а также апробацией на ведущих научных конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях. Таким образом, автореферат четко и последовательно раскрывает содержание диссертации, обеспечивая его соответствие заявленным научным положениям и выводам.

**Замечания по диссертационной работе**

1. В разделе 1.3 первой главы, где представлены методы к моделированию, такие как стохастическая геометрия и методы машинного обучения, не раскрыта единая методологическая связь между ними. В тексте упоминается использование нескольких подходов, но не поясняется, как они интегрируются в рамках общей исследовательской методологии. Для улучшения логики изложения и понимания целесообразности применения различных методов, имело бы смысл пояснить, как эти подходы взаимодополняют друг другом и каким образом их совместное использование способствует решению поставленных задач.
2. В диссертации, где представлена научная новизна работы, некоторые элементы требуют дополнительного уточнения. Например, неясно, каким образом предложенные модели превосходят существующие решения в области моделирования блокировки сигнала и микромобильности в сетях 5G/6G. Было бы целесообразно привести конкретные сравнения с аналогичными моделями из литературных источников, указав, в чём заключается основное преимущество предложенных подходов, будь то точность, вычислительная эффективность или более широкий спектр применяемых сценариев.
3. В разделе 2.2 второй главы, где рассматриваются эффекты блокировки сигнала, эти явления описаны достаточно подробно. Однако в тексте отсутствует описание конкретных сценариев развертывания сетей, которые

наиболее подвержены этим эффектам. Например, не рассмотрено, какие типы зданий (жилые, офисные, промышленные) или строительные материалы (бетон, стекло, металл) создают наибольшую блокировку сигнала и как это влияет на реальное развертывание сетей в городских и пригородных районах. Рекомендуется дополнить раздел этими уточнениями, чтобы предоставить более полное понимание влияния блокировок на проектирование и эксплуатацию сетей связи.

4. В разделе 3.3 третьей главы, где подробно рассматривается эффект мультисвязности, не полностью раскрыта его роль в снижении вероятности блокировок в специфических сценариях, таких как густонаселённые городские районы или промышленные зоны.
5. В разделе 4.1 четвёртой главы, где подробно рассматривается эффект микромобильности, не указано, как предложенные модели учитывают различия в поведении пользователей, такие как разные скорости перемещения и использование устройств в различных условиях (например, в движении, на открытом пространстве или внутри зданий). Эти вопросы могут значительно влиять на характеристики сети и качество обслуживания, поэтому целесообразно бы было дополнить раздел пояснением, как модели адаптируются к этим вариациям в поведении пользователей. Это поможет сделать модель более реалистичной и учесть влияние различных факторов на работу сети.

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 анализа и прогнозирования влияния эффектов блокировок и микромобильности на уровень качества обслуживания пользователей, имеющей важное значение для реализации современных технологий беспроводной связи в условиях высокой плотности пользователей. 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), профессор кафедры «Сетей связи и передачи данных» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»,

Парамонов Александр Иванович

«18» февраля 2025 г.

Подпись (-и) Парамонова А.И.

заверяю

заместитель начальника

административно-кадрового управления

/Н.А. Аксёнова/ 18.02.2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»,
Адрес: 193232, пр. Большевиков д.22, корп.1, г. Санкт-Петербург.
Тел: +7 (812) 326-31-63.
Факс: +7 (812) 326-31-59.
E-mail: rector@sut.ru
Страница в интернете: https://www.sut.ru.