

Бегишев Вячеслав Олегович

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА И РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭФФЕКТОВ
БЛОКИРОВКИ СИГНАЛА И МИКРОМОБИЛЬНОСТИ**

Специальность

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена на кафедре теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории вероятностей и кибербезопасности Российского университета дружбы народов им. П. Лумумбы (РУДН им. П. Лумумбы)

Самуйлов Константин Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича)

Парамонов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)

Барабанова Елизавета Александровна

доктор технических наук, с.н.с, профессор кафедры сетей связи и систем коммутации Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ)

Нетес Виктор Александрович

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией № 18 Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН)

Ляхов Андрей Игоревич

Защита состоится « ___ » _____ 202_ г. в ___ часов ___ минут на заседании разового диссертационного совета в Российском университете дружбы народов им. П. Лумумбы по адресу: г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Зал ректората.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского университета дружбы народов им. П. Лумумбы по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6 (отзывы на автореферат просьба направлять по указанному адресу) или на официальном сайте диссоветов РУДН по адресу: <http://dissovet.rudn.ru/>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 202_ г.

Председатель разового
диссертационного совета

Д. С. Кулябов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Начало XXI века в области сетей и систем телекоммуникаций ознаменовалось появлением целого ряда технологий, которые ранее редко применялись в сетях связи общего пользования. Эти технологии включают в себя беспроводные сенсорные сети с различными услугами и приложениями, сети колесного транспорта, медицинские сети и др. Изначально внедрение таких сетей потребовало разработки концепции, способной объединить их и быть основой для дальнейшего развития телекоммуникационных систем. Данная концепция была сформирована как сети не только пользователей, но и устройств, машин и т. п., и получила название «Интернет вещей» (IoT, Internet of Things). IoT смог архитектурно и технологически объединить сети, предназначенные для различных отраслей с разными требованиями к качеству обслуживания (QoS, Quality of Service), качеству восприятия (QoE, Quality of Experience) и характеристикам трафика, что привело к появлению гетерогенных сетей, исследование и проектирование которых существенно отличаются от гомогенных сетей.

На сегодняшний день активное развитие гетерогенных сетей сосредоточено на высокочастотных технологиях, таких как 5G NR (5th Generation, New Radio), и направлено на появление будущего поколения систем связи 6G (6th Generation). Современные исследования уделяют особое внимание этим направлениям. Выпуск спецификаций 5G NR некоммерческим партнерством 3GPP (3-rd Generation Partnership Project) в декабре 2017 года способствовал стремительному развитию стандартов сетей 5G. В указанных спецификациях описываются возможности развертывания сетей доступа 5G NR независимо от сетей 4G стандарта LTE (Long Term Evolution). Технология 5G NR на частотах, соответствующих микроволновому и миллиметровому (mmWave) диапазонам длин волн, направлена на улучшение показателей эффективности беспроводной связи. Исследуются также возможности применения терагерцевого (THz) диапазона частот в сотовой связи 6G. THz-диапазон частот и mmWave-диапазон длин волн имеют широкий спектр частот, что позволяет достичь высоких скоростей передачи данных и реализовать принципиально новые приложения, такие как приложения дополненной и виртуальной реальности (AR/VR), голографическое телеприсутствие и Тактильный интернет. Это создает возможности для поддержки телекоммуникационных услуг с высокими требованиями к таким параметрам, как задержка и пропускная способность. Поэтому задачи исследования высокочастотных сетей на сегодняшний день становятся одной из важнейших и находятся в центре внимания данной диссертационной работы.

Однако использование THz-диапазона частот приводит как минимум к двум специфическим проблемам. Одна из них связана с блокировками луча малыми и средними объектами, перекрывающими путь прямой видимости (Line-of-Sight, LoS),

приводящая к прерыванию сигнала связи в mmWave-диапазоне длин волн, сохраняется и для THz-диапазона частот. Вторая, наименее исследованная задача, это проблема микромобильности, которая означает незначительные изменения положения абонентского устройства (АУ) в руке пользователя (например, вращения), нарушающие взаимное выравнивание лучей приемника и передатчика, что может привести к потере качества связи и нестабильности соединения в беспроводных сетях THz-диапазона частот. Эти две крупные проблемы и являются предметом исследования в данной диссертационной работе.

С учетом появления в высокочастотных сетях диаграмм направленности с шириной луча в один градус или даже меньше, статической и динамической блокировок, микромобильности для развертывания сетей связи на mmWave-диапазоне длин волн и THz-диапазоне частот требуется расширение существующих концепций, предложенных для систем LTE. К настоящему моменту недостаточно изучены ключевые технические возможности сетей 5G/6G. Исследования часто ограничиваются мультисвязностью в сетях mmWave-диапазона длин волн без учета сложности практического развертывания, также не анализируется влияние новых технологий на изменения объема передаваемого трафика и не учитывается новый эффект микромобильности, что требует дополнительных исследований. Несмотря на стандартизацию сетей 5G и начало разработки стандартов сетей 6G, эти проблемы остаются нерешенными и требуют внимания исследователей. Таким образом, задача обеспечения показателей качества в высокочастотных сетях, включая транспортные системы и промышленные объекты, в условиях эффектов блокировки сигнала и микромобильности является актуальной, особенно в контексте практических сценариев, таких как плотная городская застройка.

Степень разработанности темы. В современных исследованиях как в России, так и за рубежом основное внимание уделено изучению показателей QoS в сетях 5G NR. Этот интерес обусловлен не только новейшими технологиями, но и современными подходами к анализу и оптимизации таких сетей, включая применение различных моделей и методов. Вопреки этому множество задач до сих пор остаются нерешенными, в том числе и в методологическом плане.

Разработанность темы исследования, связанной с анализом показателей качества обслуживания в беспроводных сетях с блокировкой сигнала, основана на обширном обзоре работ признанных исследователей в этой области. Классические методы построения и анализа моделей систем и сетей основаны на теории телетрафика и теории массового обслуживания, однако полученные результаты оказались недостаточными в современных условиях развития сетей 5G и 6G, и, поэтому исследования продолжаются и по сей день. В диссертации также исследуется применение в сетях 5G NR мобильных базовых станций (БС) на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Предложены методы улучшения обслуживания пользователей как на абонентском, так и транзитном участках в сетях доступа 5G NR. Эти подходы исследованы с целью решения сложных задач, связанных с эффективным управлением данными различных типов трафика. Такие известные российские и зарубежные ученые (в алфавитном порядке), как Г.П. Башарин, П.П. Бочарова, В.М. Вишневецкий, Ю.В. Гайдамака, А.В. Дворкович, А.Н. Дудин, В.Г. Карташевский, А.Е. Кучерявый, Е.А. Кучерявый, А.Г. Ляхов, А.И. Ляхов, Д.А. Молчанов, А.Н. Моисеев, С.П. Моисеева, В.А. Наумов, В.А. Нетес, А.И. Парамонов, В.А. Печинкин, А.П. Пшеничников, А.В. Росляков, К.Е. Самуйлов, Б.А. Севастьянов, Р.Л. Смелянский, И.А. Соколов, Н.А. Соколов, С.Н. Степанов, А.Д. Харкевич, Е.М. Хоров, И.И. Цитовича, М.А. Шнепс-Шнеппе, Г.Г. Яновский, и др., а наиболее значимыми зарубежными авторами являются J. G. Andrews, F. Baskett, T.-L. Charlie, J. Cheng, E. Dahlman, M. Dohler, E. Gelenbe, A. Goldsmith, R. Heath, X. Hei, H. Holma, V.B. Iversen, F. Kelly, L. Kleinrock, P.J. Kuhn, Y. Liu, D. Lucantoni, J.C.S. Lui, O. Martikainen, P.V. Miegheem, D. Mitra, B. Mukherjee, M.F. Neuts, S. Parkvall, P. Popovski, S. Rangan, T. Rappaport, J.W. Roberts, K.W. Ross, M. Sherif, S. Singh, C. Siva Ram Murthy, S. Talwar, J. Torsner, A. Toskala, D. Vucetic, W. Whitt, H. Zhang, Z. Zhang, M. Zarki и др., представили фундаментальные исследования, затрагивающие проблемы качества обслуживания и методы моделирования в беспроводных сетях. Их работы являются базой для разработки новых методов и моделей.

Цели и задачи исследования. Диссертация посвящена решению крупной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение – разработке моделей и методов для анализа и расчета показателей качества обслуживания в высокочастотных сетях доступа в миллиметровом диапазоне длин волн и терагерцевом диапазоне частот в условиях эффектов блокировки и микромобильности. Для достижения этой цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- организация и проведение эксперимента для анализа блокировки луча прямой видимости в ТГц-диапазоне частот в условиях помещений с учетом отражения сигнала от конструкций из различного типа строительных материалов;
- разработка методов идентификации блокировок пути прямой видимости в высокочастотных сетях mmWave-диапазона длин волн и ТГц-диапазона частот;
- разработка модели для расчета вероятности блокировки в промышленных сценариях развертывания сетей 5G NR для подвижных блокирующих роботизированных устройств;
- разработка моделей и методов анализа вероятности блокировки в высокочастотных сетях с применением летательных аппаратов с учетом геометрии зданий и свойств атмосферных облаков;

- разработка методологии исследования эффекта микромобильности в высокочастотных сетях для определения оптимальных интервалов времени между запусками процедуры поиска луча антенны;
- разработка статистического метода идентификации приложений на оконечных устройствах на основе метода машинного обучения;
- разработка модели для оценки времени, проводимого колесным устройством в состоянии устойчивой связи в условиях городского развертывания систем 5G NR mmWave-диапазона длин волн с учетом режима мультисвязности;
- разработка модели ресурсной системы массового обслуживания (PeCMO), учитывающей мультисвязность между технологиями 5G NR на частотах, соответствующих mmWave-диапазону длин волн и диапазону ниже 6 ГГц (суб-6 ГГц), для расчета вероятности блокировки сессии пользователей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются высокочастотные сети доступа в миллиметровом диапазоне длин волн и терагерцевом диапазоне частот, а предметом исследования – методы распределения радиоресурсов и обслуживания абонентов в условиях эффектов блокировки сигнала и микромобильности.

Научная новизна диссертационных исследований

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).

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты диссертации вносят большой вклад в область исследований высокочастотных сетей связи как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Исследованы характеристики блокировки сигнала связи на частотах 120–180 ГГц, а также предложены модели распространения для этих частот. Разработанные модели являются универсальным инструментом для планирования и оценки эффективности сетей 5G/6G в высокочастотном диапазоне. Также созданы модели оценки вероятности блокировки в высокочастотных сетях связи в сценариях применения летательных аппаратов, которые учитывают геометрию зданий городской застройки и свойства типов атмосферных облаков. Это важный шаг в обеспечении связности в воздушных пространствах и расширении возможностей применения беспроводной связи в авиации. Теоретическая значимость также заключается в разработке 3D-моделей для оценки вероятности блокировки в промышленных сценариях развертывания сетей 5G NR с использованием подвижных блокирующих роботизированных устройств. Указанные модели разработаны посредством совместного применения методов фотограмметрии и стохастической геометрии. Кроме того, впервые предложена методология анализа модели микромобильности для сетей связи 5G/6G, что позволяет определить интервал времени между запусками поиска луча на БС в реальном времени. Достоверность результатов подтверждена измерениями на оборудовании THz-диапазона частот. В последней – пятой главе с учетом режима мультисвязности между технологиями 5G NR на частотах, соответствующих mmWave и суб-6 ГГц диапазонам, разработаны модели и

методы повышения характеристик обслуживания абонентов, включая особенности обслуживания эластичного трафика.

Кроме того, в пятой главе разработаны модели для совместного развертывания сетей в миллиметровом (1–10 мм) и микроволновом (1 мм–1 м) диапазонах длин волн для потокового трафика. Предложенные модели имеют важное практическое значение, поскольку могут стать основой для расчета оптимального использования спектральных ресурсов и улучшения качества обслуживания в различных условиях работы сети. Разработанные модели и методы могут применяться в различных предметных областях, таких как планирование и оптимизация сетей связи в условиях плотной городской застройки, в промышленности и в авиации.

Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении ряда крупных научно-исследовательских проектов, где автор диссертационной работы являлся руководителем и исполнителем, в том числе при исследованиях по грантам РФФИ, а также НИР, выполняемых по приоритетным научным направлениям в РУДН им. П. Лумумбы.

Методология и методы исследования. Для решения задач, сформулированных в диссертационной работе, применялись методы теории вероятностей, стохастической геометрии, теории массового обслуживания, теории телетрафика, имитационного и натурного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Статистические методы идентификации блокировок пути прямой видимости позволяют повысить вероятность идентификации на порядок на интервалах времени 1–3 мс после наступления блокировки в сетях THz-диапазона частот (глава 2).
2. Модели для анализа вероятности блокировки в промышленных сценариях развертывания сетей 5G NR для подвижных блокирующих роботизированных устройств позволяют оценить вероятности блокировки в диапазоне 20–40 % в зависимости от типа роботизированного устройства и параметров сценария развертывания (глава 3).
3. Модель для анализа уровня принимаемой мощности сигнала в сети с участием воздушных судов должна учитывать влияние свойств типов атмосферных облаков, погодных условий и географического положения. Размещение БС на крышах зданий позволяет снизить вероятность блокировки на порядок по сравнению с наземным развертыванием (глава 3).
4. Модель статистического анализа эффекта микромобильности в высокочастотных сетях в сценариях потокового видео и телефонных вызовов позволяет определить интервал времени между процедурой запуска поиска луча до 1 с. Для приложений,

- характеризующихся высокой микромобильностью абонентского устройства, наилучшие значение интервала находятся в диапазоне от 100 до 500 мс (глава 4).
5. Метод идентификации приложений на оконечных устройствах, основанный на методах машинного обучения, позволяет с высокой вероятностью определить тип приложения (глава 4).
 6. Модель для оценки времени, проводимого колесным устройством в состоянии устойчивой связи в городском развертывании систем 5G NR в mmWave-диапазоне длин волн с учетом режима мультисвязности, применима для сценарий с дублирующей БС и увеличивает время устойчивой связи от 50 до 100 % в зависимости от плотности транспортного потока (глава 5).
 7. Модель СМО позволяет учесть режим мультисвязности между технологиями 5G NR на частотах, соответствующих mmWave-диапазону длин волн и диапазону суб-6 ГГц, а также особенности обслуживания эластичного трафика. Применение модели позволяет определить, что в режиме мультисвязности скорость обслуживания эластичного трафика в сети 5G NR в суб-6 ГГц диапазоне, снижается в 2 раза на интервалах времени, сравнимых с длительностью блокировки (глава 5).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Специальность диссертационной работы – 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций. Работа соответствует пунктам паспорта 1, 3, 6 и 11 указанной специальности.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается комплексным подходом, основанным на применении комбинации методов математического и имитационного моделирования. Научные результаты опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах, а также апробированы в докладах на российских и международных конференциях, таких как IEEE Globecom, Abu Dhabi, UAE, 2019; ACM MobiCom (Conference on Mobile Computing and Networking), New Orleans, USA, 2021; DCCN (International Conference on Distributed Computer and Communication Networks), Moscow, Russia, 2020-2023 гг.; International Conference on Modern Network Technologies (MoNeTec), Moscow, Russia, 2022 г.; NEW2AN (International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems), Dubai, UAE, 2023 г., а также на семинарах Института компьютерных наук и телекоммуникаций РУДН им. П. Лумумбы и Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук.

Личный вклад автора. Автор самостоятельно достиг научных результатов, представленных в диссертации, активно участвовал в проведении имитационного моделирования и натурных экспериментов.

Публикации по теме диссертации. 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.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списков сокращений и условных обозначений, литературы и одного приложения. Общий объем работы составляет 356 страниц, включая 114 рисунков, 16 таблиц, список литературы из 352 наименований. В приложении приведены документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, проведен обзор исследований в предметной области, сформулированы цель и задачи исследования. Представлены научная новизна результатов и положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о достоверности и апробации результатов работы, о личном участии автора в получении результатов и соответствии паспорту специальности.

В первой главе диссертации проведен обзор беспроводных сетей высокочастотного диапазона. Охарактеризованы сети доступа 5G NR на частотах, соответствующих mmWave-диапазону длин волн. Рассмотрены вопросы анализа блокировки сигнала связи и влияния на него погодных условий.

Представлен обзор исследований THz-диапазона частот, на которых будут развернуты будущие системы связи 6G. Показаны проблемы передачи радиосигнала, также определены преимущества и технические возможности THz-диапазона частот. Определено, что применение этого диапазона частот сопряжено с различными сложностями, включая атмосферное поглощение и потери в свободном пространстве.

Во второй главе диссертации изложены результаты по организации и проведению натурального эксперимента по анализу блокировки луча прямой видимости для высокочастотных сетей в помещениях, учитывая отражения сигнала в условиях применения различных типов строительных материалов. Основное внимание уделено разработке и анализу эмпирических моделей, позволяющих описывать характеристики радиоканала и идентифицировать блокировки сигнала. Разработаны алгоритмы идентификации блокировки, основанные на статистических тестах.

Проведен обзор современных исследований по анализу блокировки сигнала и методов ее идентификации. Сформулированы задачи для проведения натурального эксперимента по анализу блокировки пути прямой видимости (Line-of-Sight) LoS для высокочастотных сетей в помещениях.

В разделах 2.1 и 2.2 представлена модель блокировки LoS в THz-диапазоне на несущей частоте 156 ГГц. Проведена серия измерений в помещении с применением AR и VR приложений. Исследованы несколько значений расстояния между передатчиком (Tx) и приемником (Rx), их высоты, а также разные позиции блокирующего объекта (блокатор), пересекающего LoS. Иллюстрация сценария измерений представлена на рис. 1, *а*. Считается, что блокатор пересекает LoS со средней скоростью 3,5 км/ч. В ходе эксперимента наблюдались небольшие изменения температуры окружающей среды $T_{AMB} = 23 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ и относительной влажности $RH = 23,9 \pm 0,6 \text{ } \%$. Исследования проводились в пустом зале с размерами 7,5 м × 2,4 м × 3 м (длина × ширина × высота). Также был организован и проведен эксперимент по идентификации блокировки с учетом отражения сигнала от поверхностей с конструкцией разного типа строительных материалов (рис. 1, *б*).

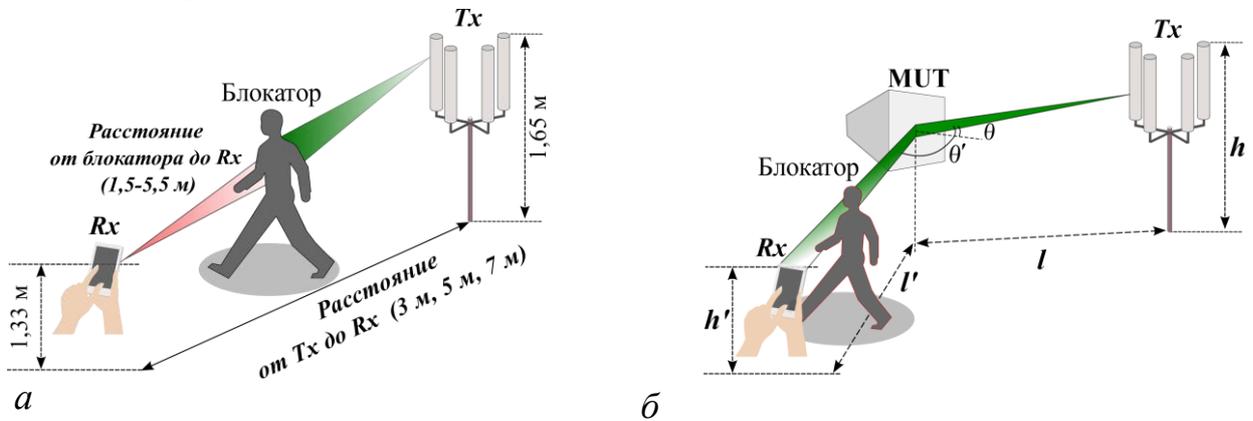


Рисунок 1. Схема эксперимента: *а* – распространение сигнала при LoS; *б* – отражение сигнала (MUT, англ. Material Under Test)

Научные результаты показывают, что наличие отражений оказывает незначительное влияние на уровень затухания сигнала. Уровень сигнала остается в диапазоне в среднем от 10 до 13 дБ, даже если есть отражения.

Проведен статистический анализ уровня падения сигнала. Выявлено, что уровень затухания, вызванного блокировкой в помещении, существенно ниже, чем в открытых пространствах. Такой вывод отражается как в среднем значении затухания (рис. 2, *а*), так и в функции распределения (ФР) вероятностей затухания сигнала (рис. 2, *б*).

Результаты проведенного эксперимента показали, что уровень затухания, вызванного блокировкой сигнала в помещении, сильно зависит от высоты расположения Tx и Rx . На рис. 2, *а*, при значении высоты (1,65 м), характерной для VR-шлемов, наблюдается стабильное затухание на всех рассмотренных расстояниях, составляющее приблизительно 8 дБ. Однако при более низкой высоте (1,33 м) наблюдаются изменения ослабления сигнала в зависимости от расстояния между устройствами. На близких расстояниях уровень затухания достигает от 12 до 15 дБ, в то время как на больших дистанциях оно уменьшается до 10 дБ.

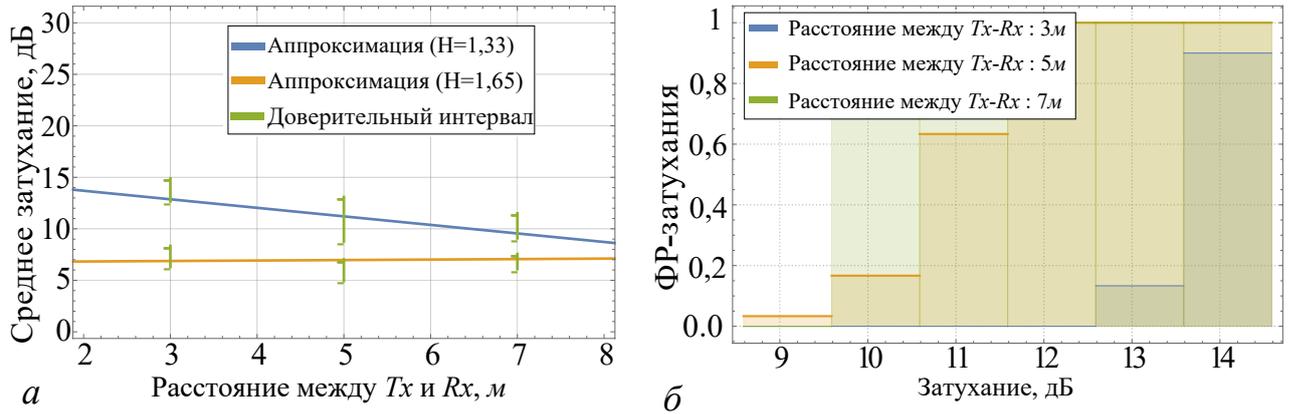


Рисунок 2. Затухание сигнала при пересечении блокатором LoS:
 а – средние значения уровня затухания; б – ФР затухания

Предложен новый алгоритм идентификации блокировки и проведен анализ его эффективности на основе реальных данных. Для выявления резких скачков в статистике уровня принимаемого сигнала (Received Signal Strength, RSS) при блокировке применяются методы определения скачкообразных изменений в статистике случайных процессов. Простейший метод основан на установке порогового значения, при котором блокировка считается обнаруженной при падении уровня $\{\xi_i, i=1,2,\dots\}$ RSS ниже установленного порога.

Пусть $\{\xi_i, i=1,2,\dots\}$ – последовательность наблюдений RSS. Значение статистики экспоненциально взвешенного скользящего среднего (Exponentially Weighted Moving Average, EWMA) в момент n , обозначенное через L_{ξ_n} , вычисляется следующим образом:

$$L_{\xi}(n) = \gamma \xi(n) + (1 - \gamma) L_{\xi}(n-1). \quad (1)$$

Контрольные пределы для диаграмм EWMA получены в следующей форме:

$$E[\xi] = \pm k \sigma[\xi] \sqrt{\left(\frac{\gamma}{2-\gamma}\right) (1 - (1-\gamma)^{2n})}, \quad (2)$$

где k – параметр алгоритма, γ – параметр EWMA сглаживания.

В третьей главе диссертации разработаны 3D-модели для оценки вероятности блокировки в промышленных сценариях развертывания сетей 5G NR для подвижных блокирующих роботизированных устройств и предложены две модели для анализа вероятности блокировки в сценариях применения летательных аппаратов: первая, учитывающая геометрию зданий городской застройки, вторая – с учетом геометрических и физических свойств атмосферных облаков при организации связи с участием воздушных судов. Научные результаты получены путем имитационного моделирования.

В разделе 3.1 представлена модель развертывания сетей доступа 5G NR в промышленной среде, аналогичной автоматизированному заводу с несколькими

производственными линиями (рис. 3). На рис. 3, *а*, изображен сценарий размещения автоматизированных устройств согласно Манхэттенскому Пуассону процессу (Manhattan Poisson Line Process, MPLP) в одном из цехов завода. Процесс MPLP характеризуется двумя пуассоновскими потоками параметр первого из которых отложен по оси X , а второго – по оси Y . Интенсивности этих потоков обозначены λ_x для оси X и λ_y для оси Y . БС и абонентское устройство (АУ) размещены на высотах h_A и h_U соответственно. БС находится в начале системы координат, а АУ (модель робота) расположено на расстоянии $(l_x; l_y)$ от нижнего левого угла (рис. 3, *б*).

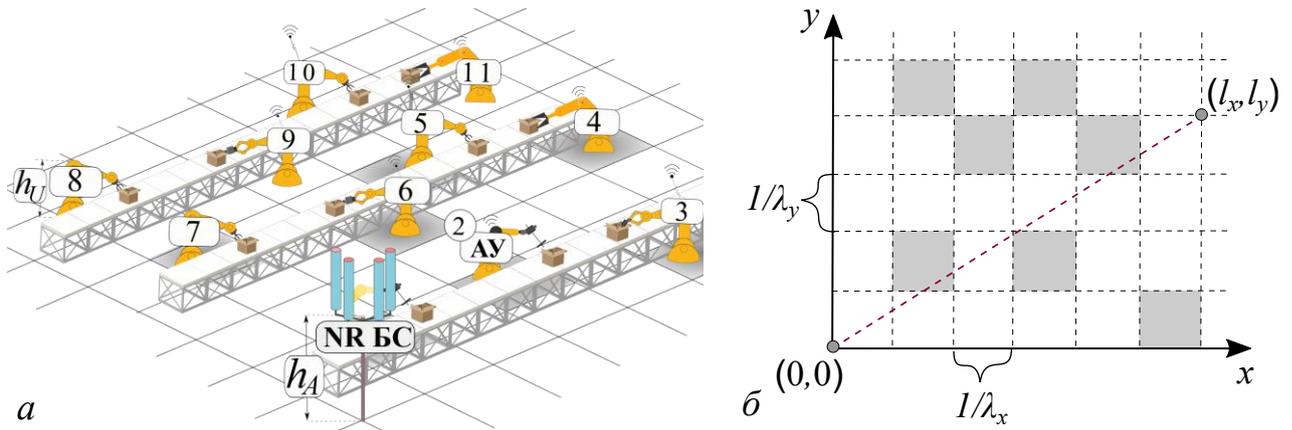
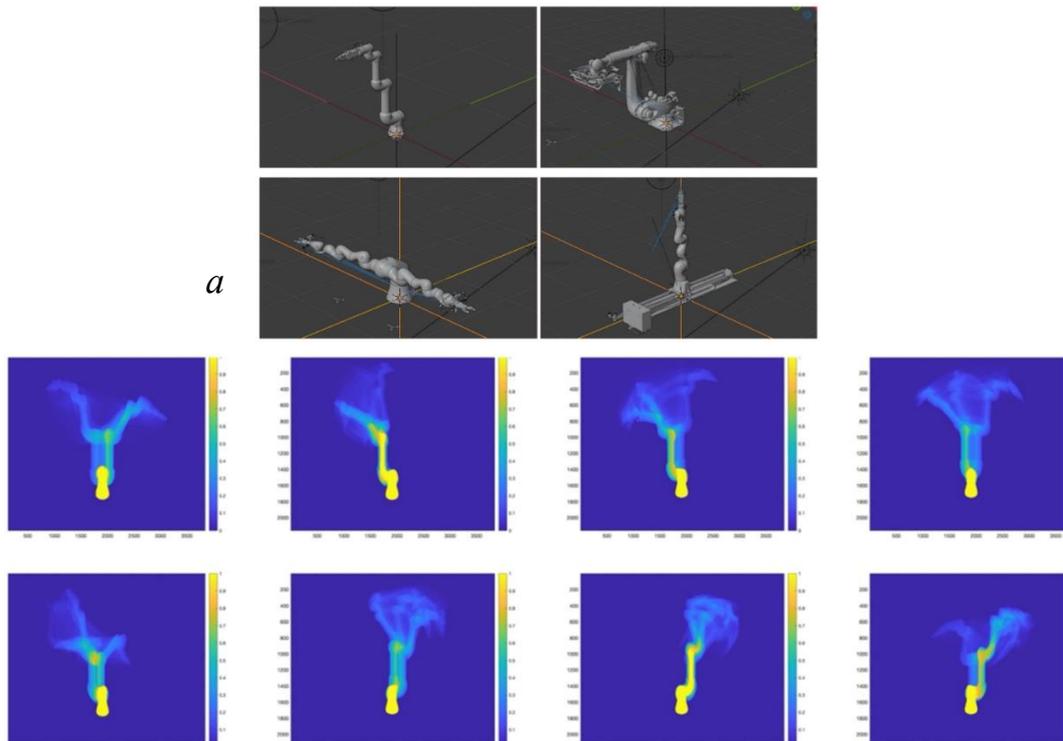


Рисунок 3. Иллюстрация производственных линий завода: *а* – сценарий размещения автоматизированных устройств; *б* – двумерная визуализация абстрактной модели

В соответствии со схемой, проиллюстрированной на рис. 4, разработаны 3D-модели с применением среды моделирования BlenderKit для анализа вероятности блокировки LoS. Выбраны универсальные модели роботов, такие как Ur5e, Kuka Quantec, двуручный KUKA Iiwa 14, имитирующие рабочие места в заводских цехах. Роботы выполняли периодические движения в соответствии со своими рабочими задачами.

Методология анализа блокировки LoS включает два этапа, см. рис. 4. Вначале с помощью фотограмметрии создаются «карты прозрачности» для автономных роботов, находящихся в различных геометрических положениях. Фотограмметрический подход включает отслеживание объектов и определение характеристик путей LoS. Среда моделирования BlenderKit применяется для создания 3D-моделей и «карт прозрачности» путем создания изображений траекторий движения роботов, а затем программное окружение Matlab/Simulink преобразует эти иллюстрации в матрицы данных. Предложенная методология моделирования сценария подвижных роботов в промышленной среде также включает вычисление усредненной вероятности блокировки LoS. На рис. 4 показаны «карты прозрачности» и представлены вероятности блокировки LoS.



б Рисунок 4. Этапы оценки вероятности блокировки LoS:
a – настройка сцены; *б* – видимость с различных углов наблюдения

На графиках (рис. 5) показано, как высота взаимодействующих объектов (блокатор, АУ, БС) влияет на значения вероятности блокировки LoS. Увеличение высоты БС (h_A) существенно снижает вероятность блокировки LoS.

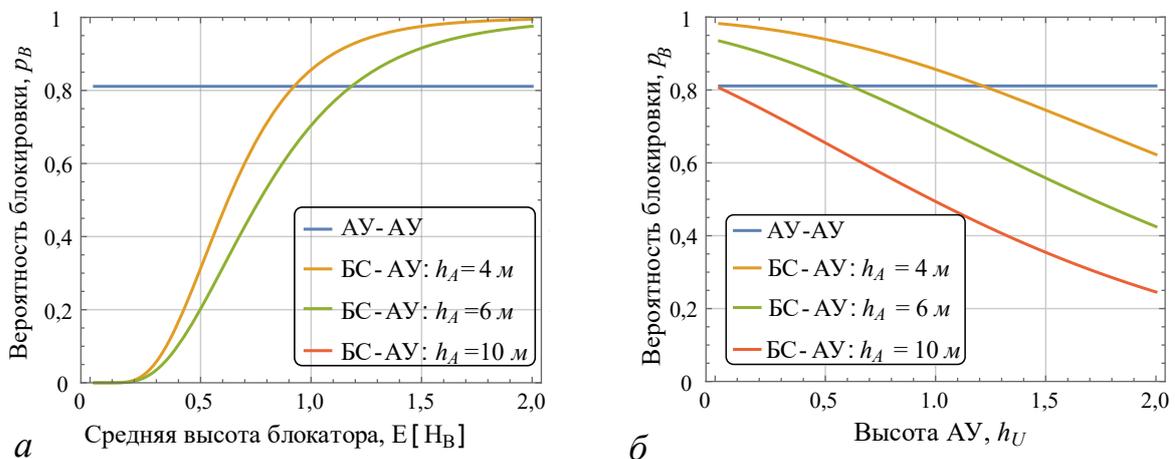


Рисунок 5. Вероятность блокировки в зависимости от высоты блокаторов и высоты расположения АУ: *a* – влияние высот блокаторов; *б* – влияние высоты АУ

В разделе 3.2 представлен анализ исследований сценариев развертывания сетей 5G NR, проводимых международными организациями ИТУ-R и 3GPP. В этих условиях развертывания высокочастотных сетей построена модель оценки вероятности блокировки сигнала связи между БПЛА и БС на основе типичной сетки городской застройки с учетом распределения высот зданий.

Затем проводится оценка влияния параметров системы, включая высоты взаимодействующих объектов, среднее значение и отклонение высоты зданий, а также параметры улиц и зданий, на вероятность блокировки сигнала между БС и БПЛА.

График на рис. 6 показывает влияние БС, установленных на крыше, на вероятность блокировки LoS с БПЛА. Установка БС на крышах зданий имеет важное значение, так как это существенно снижает вероятность блокировки сигнала связи. Даже небольшое количество дополнительных БС, установленных на крыше, способно значительно уменьшить значение вероятности блокировки сигнала связи с БПЛА.

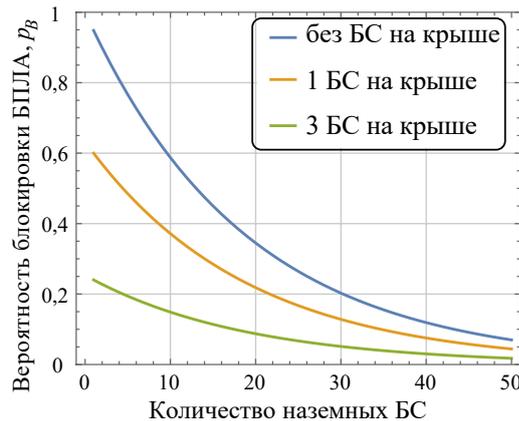


Рисунок 6. Влияние установки БС на крыше зданий

Добавление одной БС, установленной на крыше, эквивалентно 6-12 наземным БС. Для сетевых операторов более выгодно размещать специализированные БС на крышах для обеспечения надежного покрытия зоны использованием БПЛА.

В разделе 3.3 разработана модель распространения сигнала связи от поверхности Земли к самолету в THz-диапазоне частот с учетом свойств типов атмосферных облаков. Применены методы интегральной геометрии и теории вероятностей для расчета вероятности блокировки канала связи облаками. Предполагается, что наземная БС и самолет оборудованы приемо-передатчиками с идеально выравненными лучами антенн. В предложенной модели предполагается стационарное состояние объектов и то, что движение самолета не влияет на качество связи.

Рассматривается передача сигнала по восходящей линии связи от наземной БС к самолету. С учетом поглощения атмосферы водяным паром и кислородом, принимаемая мощность антенны самолета может быть рассчитана по формуле

$$P_{out}(f, d) = P_{in} \left(\frac{4\pi fd}{c} \right)^{-2} \frac{G_R G_T}{L_A(f, d) L_C(f, d)}, \quad (3)$$

где P_{in} – излучаемая мощность наземной БС, G_T и G_R – коэффициенты усиления передающей и приемной антенны, $L_A(f, d)$ – затухание из-за поглощения в атмосфере, $L_C(f, d)$ – потери при распространении из-за блокировки облаками, f – несущая частота, c – скорость света в среде, d – расстояние между БС и самолетом.

В зависимости от погодных условий путь распространения сигнала может быть перекрыт облаками. Таким образом, общее затухание, вызванное облаками, можно определить формулой

$$L_C(f, d) = E \left[\sum_{k=1}^K p_k L_k \right], \quad (4)$$

где p_k – вероятность того, что облака в слое k перекрывают путь распространения сигнала, L_k – затухание, вызванное блокировкой облаками в слое k . Затем, используя инструменты интегральной геометрии, вычисляется вероятность p_k .

Применив метод интегральной геометрии для одного слоя облаков, получаем

$$p_C = \frac{2[S_B]}{2\pi(S_A + E[S_B]) + L_A E[L_B]}, \quad (5)$$

где $E[S_B]$ и $E[L_B]$ – средняя площадь и периметр облака, S_A и L_A – площадь и периметр области A .

Пусть μ_k – плотность облаков на слое k , выраженная в числе облаков в одном квадратном километре. Исходя из приведенных выше результатов, вероятность того, что облако на определенном уровне k блокирует путь распространения сигнала, определяется формулой

$$p_k = 1 - (1 - p_C)^{\lceil \mu_k / S_A \rceil}, \quad (6)$$

где $\lceil \mu_k / S_A \rceil$ оператор округления до ближайшего целого сверху.

На графиках рис. 7 представлены значения мощности сигнала приемника самолета (R_x) в зависимости от изменений частоты и высоты полета.

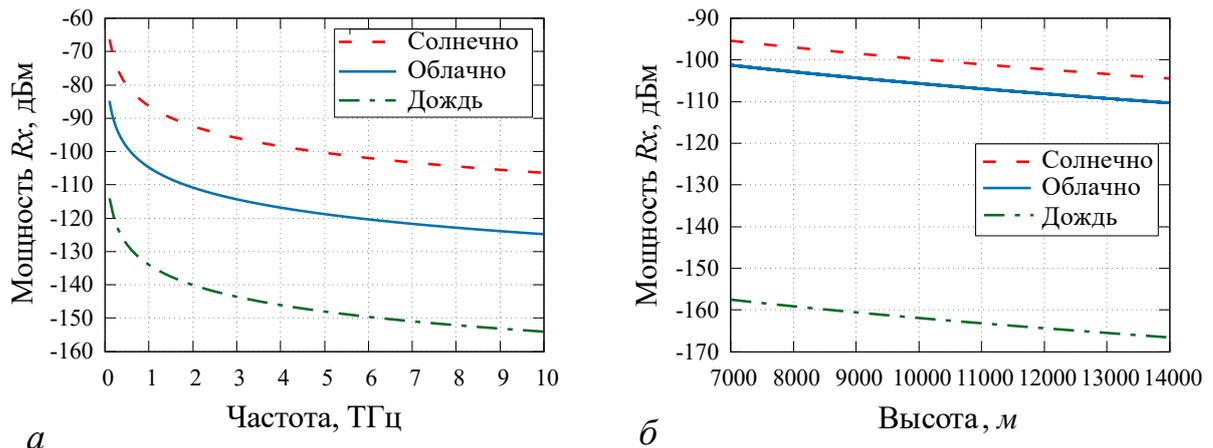


Рисунок 7. Мощность R_x в экваториальной зоне Земли:

a – мощность R_x как функция частоты; b – мощность приема как функция высоты

В солнечные дни наблюдается наилучшее распространение сигнала во всем ТГц-диапазоне частот с разницей в 15–20 дБ между солнечной и пасмурной погодой. Эти различия связаны с блокировкой облаками и атмосферным поглощением. В условиях

облачной и дождливой погоды разница составляет около 30–50 дБ в основном из-за дождя и облачности.

В четвертой главе диссертационной работы предложена методология статистического анализа эффекта микромобильности в высокочастотных сетях, позволяющая определить интервал времени между запусками процедуры поиска луча на БС. Разработан статистический метод идентификации приложений на конечных устройствах, основанный на методах машинного обучения и не требующий передачи сигнальной информации по каналу связи.

Микромобильность оказывает влияние на качество связи даже при неподвижности абонента, вызывая небольшие колебания и вращения АУ. Это связано с небольшими смещениями по осям X и Y , а также движениями по осям «крена» и «тангажа». Состояние устойчивой связи теряется, если центр луча АУ покидает область, соответствующую основному лепестку антенны ТГц БС.

В разделе 4.1 рассматривается модель взаимодействия между стационарной ТГц БС и АУ (рис. 8, а, б), оснащенными идентичными антенными решетками.

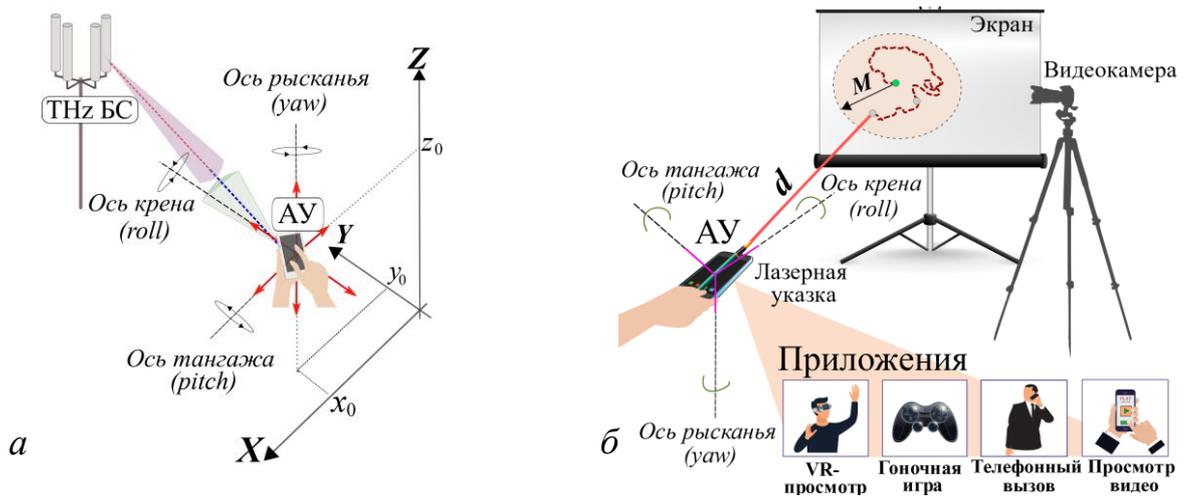


Рисунок 8. Сценарий эксперимента ТГц связи:

а – схема ТГц связи; б – схема эксперимента

Примеры траекторий АУ показаны на рис. 9. Проведены эксперименты по отслеживанию движения центра луча под воздействием микромобильности. Эксперименты проводились для четырех приложений: просмотр видео, телефонный вызов, VR-просмотр и гоночные игры. Все серии эксперимента осуществлялись на расстоянии 2 м от АУ до экрана.

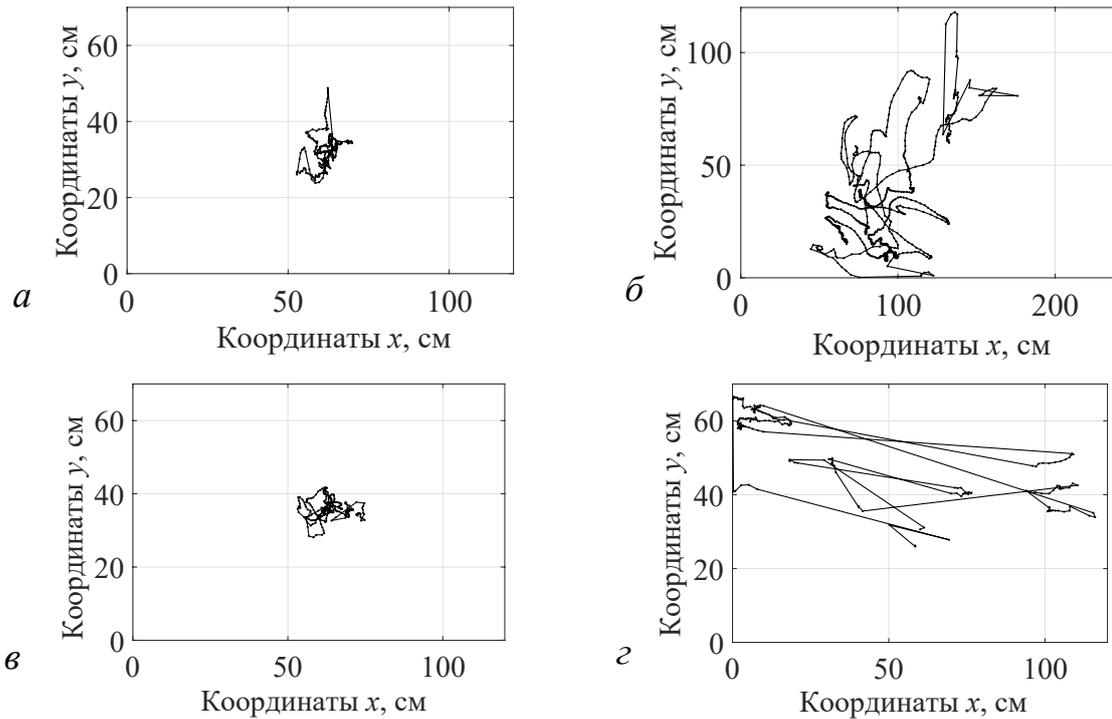


Рисунок 9. Примеры траекторий микромобильности АУ:

a – просмотр видео; *б* – VR-просмотр; *в* – телефонный вызов; *г* – гоночная игра

В разделе 4.2 построены модели микромобильности, с помощью которых исследуются изменения местоположения центра луча антенны, начиная из точки $(0,0)$, и анализируется время до достижения границы круга, соответствующего проекции основного лепестка антенны. В случае отсутствия корреляции между координатами x и y используется декомпозиция, разделяющая перемещение луча на независимые движения по осям X и Y .

Для решения этой задачи применяются три подхода: двумерная марковская цепь, декомпозиция на основе одномерных марковских цепей и декомпозиция на основе случайного блуждания. Эти методы позволяют моделировать процесс перемещения центра луча антенны.

На рис. 10 показана ФР времени до достижения границы круга, соответствующего проекции основного лепестка антенны, для рассматриваемых моделей, а также эмпирическая ФР для всех типов приложений. Для оценки точности моделей применяется метрика «время до выхода из состояния устойчивой связи». В моделях метрика определяется временем первого достижения границы (First Passage Time, FPT).

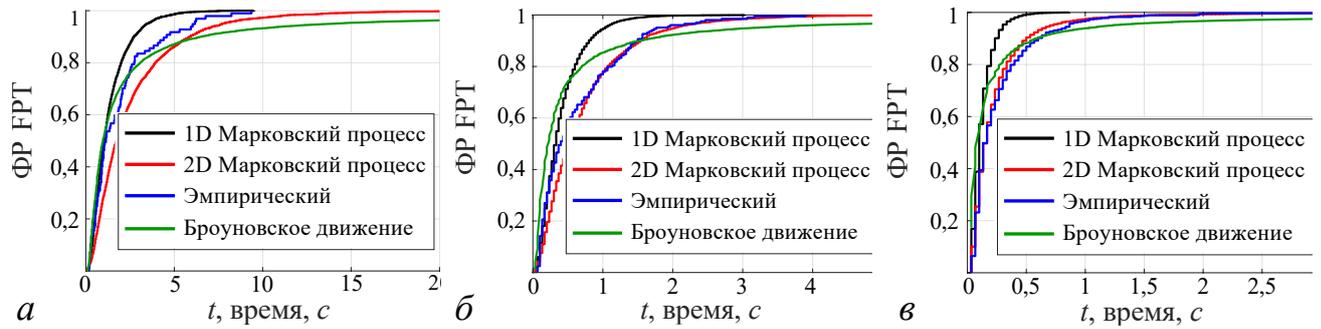


Рисунок 10. Функции распределения для рассматриваемых приложений:
a – просмотр видео; *б* – телефонный звонок; *в* – просмотр VR

Результаты показывают, что модель броуновского движения хуже всего приближает эмпирическую ФР величины времени первого достижения границы. Двумерная марковская цепь обеспечивает более точное приближение.

В разделе 4.3 рассмотрены две метрики эффективности ТНз связи: доля времени простоя, т.е. это время отсутствия связи, и спектральная эффективность.

Показано, что увеличение расстояния между АУ и БС приводит к уменьшению спектральной эффективности. Это объясняется тем, что с увеличением расстояния сигнал становится более подверженным атмосферному поглощению. Однако время устойчивой связи увеличивается при удалении от БС из-за роста радиуса проекции основного лепестка антенны БС. Эти выводы указывают на важность учета расстояния и размера антенной решетки.

Раздел 4.4 посвящен разработке метода удаленного определения типа приложения на АУ с применением статистических данных времени работы системы в состоянии устойчивой связи. Задача заключается в разработке метода определения типа приложения путем анализа движения центра луча и дальнейшей классификации с помощью методов машинного обучения.

В исследовании рассмотрены три типа алгоритмов машинного обучения для удаленного определения приложений: деревья решений, случайные леса и нейронные сети. Процесс решения задачи классификации включал выбор размера тестовой выборки для обучения моделей с последующим выбором оптимальных алгоритмов классификации.

Атрибуты каждой траектории применяются для классификации приложений с помощью инструментов машинного обучения Classification Learner в среде программного пакета Matlab. Точность классификации оценивается как доля правильно классифицированных приложений от общего числа тестовых образцов (рис. 11).

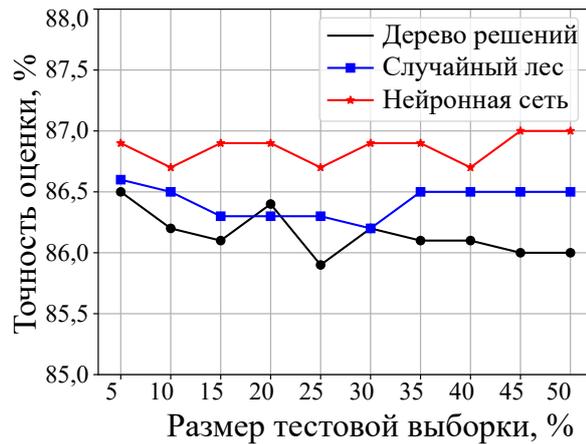


Рисунок 11. Точность классификации для приложений третьей группы: VR-просмотр и игры

Для определения типа микромобильности приложений были сформированы три группы. Классификация проводилась для приложений с быстрой микромобильностью («VR-просмотр» и «гоночная игра») и медленной микромобильностью («телефонный вызов» и «просмотр видео»), а также между отдельными типами приложений. В первом случае точность классификации составляет 99 %. Для второго случая точность классификации немного ниже, находится в диапазоне от 85,7 до 87 %.

Пятая глава посвящена задачам повышения качества обслуживания с учетом двух типов трафика – потокового и эластичного в условиях городской среды. Исследуются влияние каждого типа трафика на показатели качества обслуживания абонентов.

В разделе 5.1 разработана модель развертывания высокочастотной сети с учетом режима мультисвязности между колесным устройством (КУ) и точками доступа mmWave 5G NR, расположенными вдоль дороги (рис. 12). Модель учитывает также плотность транспортного потока.

Предполагается, что имеется N четных полос движения с постоянной шириной w . Точки доступа (БС, $P_i, i=1,2, \dots, 7$) устанавливаются по обе стороны улицы на фонарных столбах на высоте h_A . Исследуемое КУ связано с движением транспортного средства по одной из внутренних полос с постоянной скоростью v_U , а его высота h_U также предполагается постоянной. Точки доступа на разных сторонах улицы расположены так, чтобы образовывались равнобедренные треугольники.

В рассматриваемой модели анализируется блокировка LoS между БС, КУ и движущимися автотранспортными средствами (блокаторы). Блокаторы, представленные одномерными прямоугольниками, располагаются вдоль центральной линии каждой полосы и имеют случайные размеры. Движение автомобилей характеризуется постоянной скоростью v_B , а блокировка LoS приводит к ухудшению мощности принимаемого сигнала на 20 дБ.

Модель уличного каньона UMi 3GPP применяется для расчета распространения mmWave, где потери сигнала измеряются в децибелах (дБ):

$$L(q) = \begin{cases} 52.4 + 21.0 \log q + 20 \log f_c, & \text{заблокир.}, \\ 32.4 + 21.0 \log q + 20 \log f_c, & \text{не заблокиров.}, \end{cases} \quad (7)$$

где q – трехмерное (3D) расстояние между КУ и mmWave БС, f_c – несущая частота в ГГц.

Модель распространения (см. рис. 12) определяет три зоны для каждой БС. В первой зоне, ограниченной 3D-расстоянием R_B , связь не может быть потеряна независимо от наличия блокировки LoS. Отключение соединения во второй зоне, от R_B до R_O , происходит только в случае блокировки LoS. В третьей зоне, на расстоянии больше R_O , связь прерывается независимо от состояния пути LoS. Радиусы R_B и R_O вычисляются с применением модели распространения. КУ разрешается подключать режим мультисвязности с соседними БС, выраженное как «степень множественной связности M », что определяется числом ближайших БС, с которыми КУ может одновременно поддерживать связь. Таким образом, предполагается, что КУ может переключиться на лучшую из M доступных БС.

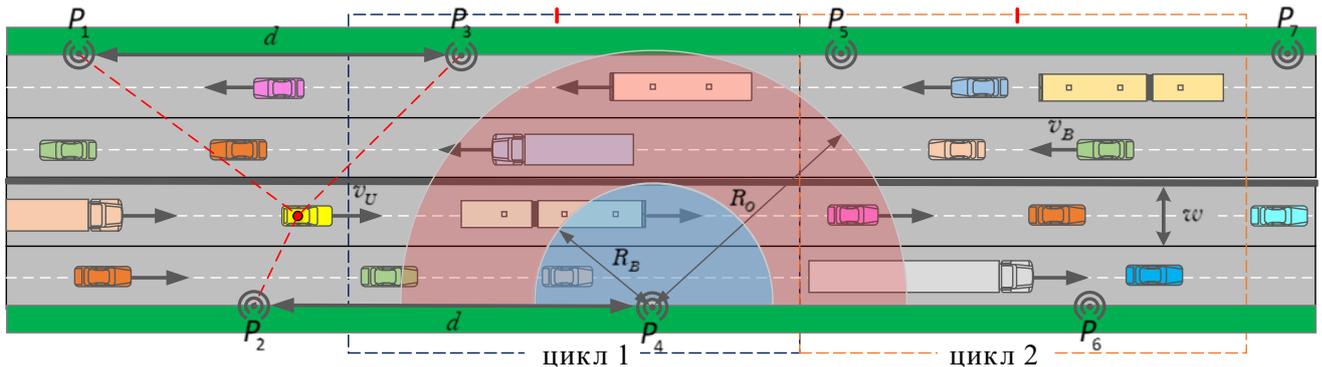


Рисунок 12. Расположение БС 5G NR вдоль улицы с режимом мультисвязности

В численном анализе исследуются показатели, связанные с блокировками в условиях различных значений плотности дорожного движения, учитывая число БС и степень множественного подключения. Рассматриваются четыре сценария: 1) плотное движение (пробки); 2) свободное движения (норма); 3) шоссе; 4) движение служебного транспорта (службы).

В разделе 5.2 с учетом мультисвязности между технологиями 5G NR на частотах, соответствующих mmWave-диапазону длин волн и диапазону суб-6 ГГц, разработана модель СМО абонентских устройств в условиях городского развертывания сети. В моделях также учитываются особенности обслуживания эластичного трафика. Показано, что применение режима мультисвязности приводит к снижению вероятности блокировки сессии на 10–30%. В условиях снижения вероятности блокировки в сети NR в режиме мультисвязности скорость обслуживания эластичного трафика в сети суб-6

ГГц NR снижается в 2 раза на интервалах времени, сравнимых с длительностью блокировки

В разделе 5.3 рассматривается развертывание нескольких БС в mmWave-диапазоне длин волн (mmWave БС), пронумерованных $1, 2, \dots, N$, внутри зоны покрытия одной БС в суб-6 ГГц диапазоне частот (суб-6 ГГц БС), изображенной на рис. 13.

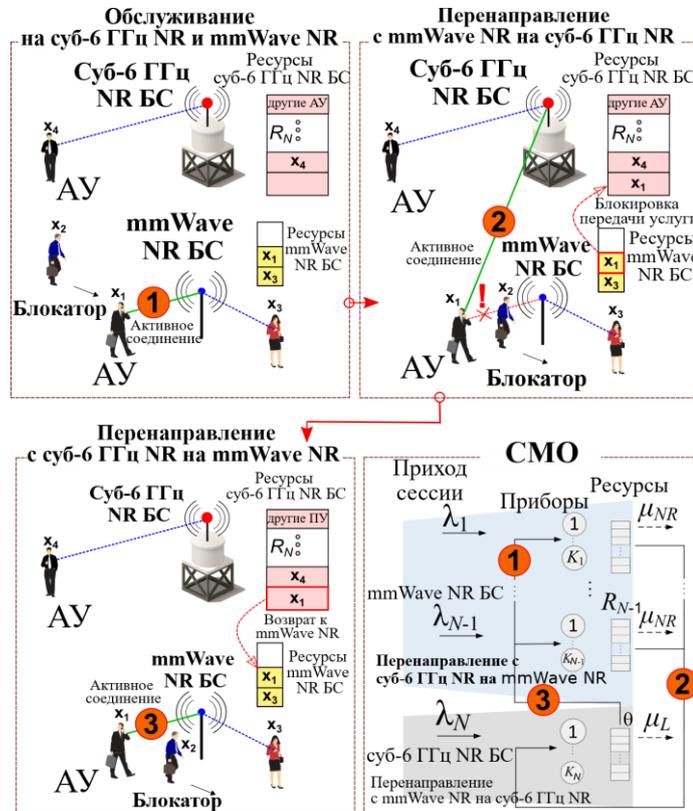


Рисунок 13. Сценарий модели нескольких mmWave БС внутри зоны покрытия одной суб-6 ГГц БС

Высоты суб-6 ГГц БС и mmWave БС составляют h_L и h_{NR} , а зоны покрытия имеют форму окружности с радиусами r_L и r_{NR} соответственно. Рассматриваются два типа АУ: один поддерживает технологии в обоих диапазонах, другой – только суб-6 ГГц. Процесс поступления новых сессий на mmWave БС является Пуассоновским с интенсивностью $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, N$. Время обслуживания сессий распределено экспоненциально, при этом все сессии запрашивают постоянный битрейт.

Сессии АУ на mmWave БС запрашивают случайное количество радиоресурсов. В случае недоступности ресурсов сессия может быть отклонена или перенаправлена на суб-6 ГГц БС с возможностью возврата обратно на mmWave БС, если имеются свободные ресурсы. Однако перенаправленные сессии на суб-6 ГГц БС также могут быть прерваны из-за ограниченности ресурсов.

Обслуживание на mmWave БС. Рассматривается i -я mmWave БС. Из-за свойства отсутствия памяти остаточное время обслуживания возвращающихся сессий экспоненциально зависит от параметра μ_{NR} . Таким образом, общая интенсивность

поступления сессий на i -й узел равна $\lambda_i + \varphi_i$, где φ_i – интенсивность поступления возвращающихся сессий из суб-6 ГГц БС на mmWave БС, а общая интенсивность перенаправлений равна $\mu_{NR} + \alpha$, где α – интенсивность прерываний обслуживания вследствие блокировки пути LoS. Следовательно, функционирование i -й mmWave БС можно описать марковским процессом $X_i(t) = \{\xi_i(t), \delta_i(t)\}$, где $\xi_i(t)$ – количество обслуживаемых сессий в момент времени и $\delta_i(t)$ – общий объем занятых радиоресурсов в момент времени t . Определены стационарные вероятности $q_{i,n}(r)$

$$q_{i,n}(r) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi_i(t) = n, \delta_i(t) = r\}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, K_i, \quad r = 0, 1, 2, \dots, R_i, \quad (8)$$

где K_i – максимальное количество сессий на i -ой mmWave БС.

Процесс $X_i(t)$ описывается РеСМО, где имеются ограниченные ресурсы и случайные требования к этим ресурсам. Стационарное распределение (8) примет следующий вид:

$$q_{i,0} = \left(1 + \sum_{n=1}^{K_i} \frac{\rho_i^n}{n!} \sum_{r=0}^{R_i} f_r^{i,(n)} \right)^{-1}, \quad q_{i,n}(r) = q_{i,0} \frac{\rho_i^n}{n!} f_r^{i,(n)}, \quad n = 1, 2, \dots, K_i, \quad (9)$$

где $\rho_i = (\lambda_i + \varphi_i) / (\mu_{NR} + \alpha)$ и $f_j^{i,(n)}$, $j \geq 0$ – n -кратная свертка ФР $\{f_j^i\}$, $j \geq 0$. Величину $f_r^{i,(n)}$ можно интерпретировать как вероятность того, что n сессий полностью займут объем r ресурсов на i -й mmWave БС.

Обслуживания на суб-6 ГГц БС также описано с помощью РеСМО со случайными требованиями к ресурсам. Однако в этом случае рассмотрены два разных типа сессий: поступающие от АУ и перемаршрутизированные от mmWave БС. Интенсивность поступления первого типа сессий равна λ_N , а время обслуживания распределено экспоненциально. Интенсивность поступления перемаршрутизированных сессий имеет следующий вид:

$$\varphi_N = \sum_{i=1}^{N-1} (\lambda_i + \varphi_i) \frac{\alpha}{\mu_{NR} + \alpha}. \quad (10)$$

В (10) выражение $\alpha / (\mu_{NR} + \alpha)$ интерпретируется как вероятность того, что сессия mmWave БС будет перенаправлена на суб-6 ГГц БС до завершения его обслуживания. Интенсивности φ_i , $i = 1, 2, \dots, N-1$, сессий mmWave диапазона длин волн, возвращающихся из суб-6 ГГц БС в исходную i -ю mmWave БС вычисляются по формуле

$$\varphi_i = (\lambda_i + \varphi_i)(1 - \pi_{N,i}) \frac{\alpha}{\alpha + \mu_{NR}} (1 - \pi_{N,N}) \pi_r, \quad (11)$$

где $\pi_{N,i}$ – вероятность прерывания новой сессии на i -ой mmWave БС и π_r – вероятность того, что перенаправленная сессия на N -ю суб-6 ГГц БС вернется на свою mmWave БС для завершения обслуживания.

Выражение для n сессий, которые полностью занимают r ресурсов, имеет следующий вид:

$$q_{N,n}(r) = q_0 \frac{\rho_N^n}{n!} f_r^{N,(n)}, \quad q_{N,0} = \left(1 + \sum_{n=1}^{K_N} \frac{\rho_N^n}{n!} \sum_{r=0}^{R_N} f_r^{N,(n)} \right)^{-1}, \quad \rho_N = \lambda_N / \mu_L + \varphi_N b. \quad (12)$$

Финальные значения вероятностей блокировки новых сессий вычисляются итеративным путем, поскольку на каждой итерации требуется добавлять еще один слой перенаправленных сессий до тех пор, пока параметр не сойдется к значению с заданной точностью. Процедура завершается после достижения требуемого уровня точности. Итеративное решение¹ требует вычисления вероятностей прерывания сессий. Их можно получить для сессий mmWave БС и суб-6 ГГц БС по формулам

$$\pi_{N,i} = 1 - q_{i,0} \sum_{n=0}^{K_i-1} \frac{\rho_i^n}{n!} \sum_{r=0}^{R_i} f_r^{i,(n+1)}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

Усредняя значения по всем mmWave БС, получено следующее выражение для вероятности блокировки новой сессии:

$$\pi_N = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i \pi_{N,i}. \quad (14)$$

Расчет вероятности того, что принятая сессия на mmWave БС будет прервана в результате блокировки и последующего перенаправления на суб-6 ГГц БС, заключается в следующем: вводится вероятность $\pi_{T,i}$ того, что сессия, первоначально поступившая на i -й mmWave БС, будет сброшена во время текущего обслуживания из-за перенаправления:

$$\pi_{T,i} = \pi_{N,N} + (1 - \pi_{N,N}) \pi_r \pi_{N,i}, \quad (15)$$

где $\pi_{N,N}$ соответствует случаю прерывания сессии на N -й суб-6 ГГц БС, а $(1 - \pi_{N,N}) \pi_r \pi_{N,i}$ является вероятностью того, что перенаправленная сессия будет принята на N -й суб-6 ГГц БС, но затем прервана из-за недостаточности ресурсов при возвращении к исходному mmWave БС.

Среднее число сессий, прерванных в результате недостаточности радиоресурсов на суб-6 ГГц БС в течение интервала длиной t , равно $\alpha \tilde{N}_i \pi_{T,i} t$, где \tilde{N}_i – среднее число сессий в узле i . Среднее число сессий, принятых за интервал времени, составляет $\lambda_i (1 - \pi_{N,i}) t$. Следовательно, вероятность того, что сессия, которая первоначально была принята на i -й mmWave БС и далее прервана, определяется по формуле

¹ Begishev, V. Performance Analysis of Multi-Band Microwave and Millimeter-Wave Operation in 5G NR Systems / V. Begishev, E. Sopin, D. Moltchanov, R. Pirmagomedov, A. Samuylov, S. Andreev, K. Samouylov // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2021. – Vol. 20, no. 6. – P. 3475–3490.

$$\pi_{O,i} = \frac{\alpha \tilde{N}_i \pi_{T,i}}{\lambda_i (1 - \pi_{N,i})}. \quad (16)$$

Усредняя значения по всем mmWave БС, получаем выражение для вероятности прерывания текущей сессии

$$\pi_O = \left(\sum_{i=1}^{N-1} \lambda_i (1 - \pi_{N,i}) \right)^{-1} \sum_{i=1}^{N-1} \alpha \tilde{N}_i \pi_{T,i}. \quad (17)$$

Для проведения численного анализа скорость передачи данных для сессий суб-6 ГГц БС была равной $c_L = 1$ Мбит/с, для mmWave БС $c_{NR} = 5$ Мбит/с, продолжительность обслуживания $\mu_L^{-1} = \mu_{NR}^{-1} = 30$ с и плотность пешеходов-блокаторов составляет $\lambda_B = 0,1$. На рис. 14, а, вероятность прерывания новой сессии увеличивается как для диапазонов mmWave, так и для диапазонов суб-6 ГГц с ростом интенсивности поступления сессий mmWave-диапазона длин волн.

При типичных значениях ширины пропускной способности mmWave и суб-6 ГГц диапазонов вероятность прерывания новой сессии mmWave остается низкой, приближаясь к 10^{-6} при $\lambda_{NR} \approx 0,3$ сессиях/с.

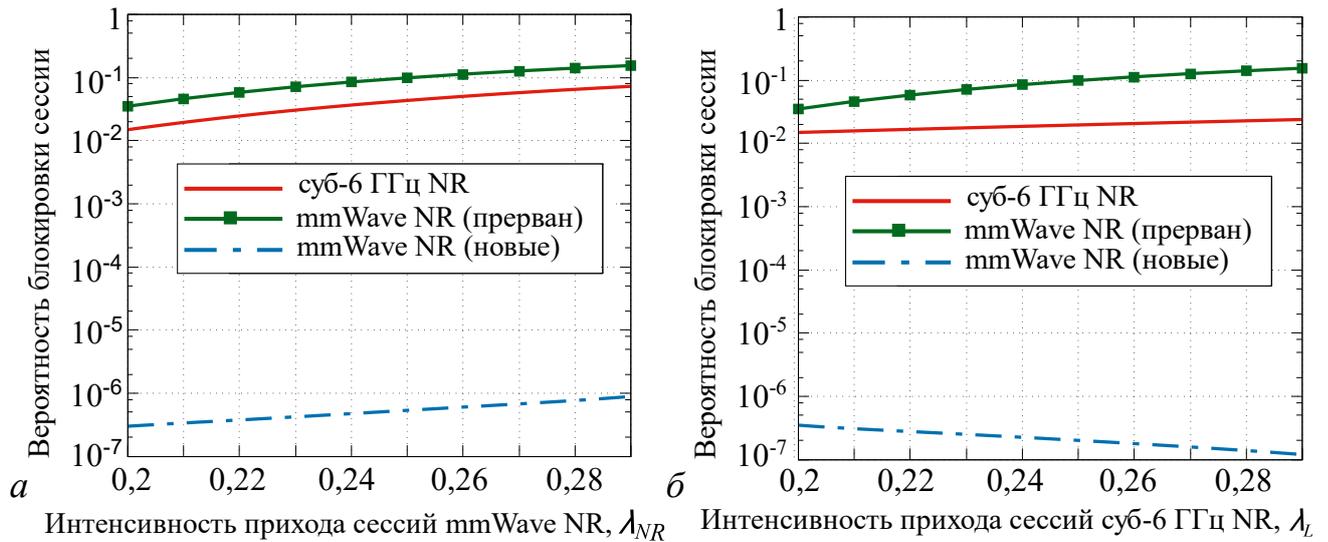


Рисунок 14. Вероятность прерывания сессий:

а – в зависимости от λ_{NR} , $\lambda_L = 0,2$ сессий/с; б – в зависимости от λ_L ,
 $\lambda_{NR} = 0,2$ сессий/с

Однако после активного поступления сессии mmWave вероятность ее прерывания резко возрастает, достигая значения 0,1. Это приводит к переходу на суб-6 ГГц БС, ухудшая эффективность системы. Вероятность блокировки обсуживаемых сессий на суб-6 ГГц растет с увеличением поступления сессий, но вероятность блокировки новых сессий на mmWave уменьшается из-за перенаправления на суб-6 ГГц БС (см. рис. 14, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Проведены эксперименты по анализу блокировки луча прямой видимости для высокочастотных сетей в помещениях, учитывая отражения сигнала в условиях применения различных типов строительных материалов. Анализ данных эксперимента показал, что при передаче сигнала на расстояние от 3 до 7 м ослабление составляет в среднем от 8 до 15 дБ, а продолжительность блокировки варьируется в среднем от 360 до 390 мс. Показано, что средние значения ослабления сигнала и продолжительности блокировки не зависят от отражений, что позволяет использовать идентичные параметры для идентификации блокировки при прямом распространении сигнала.
2. Разработаны методы анализа, которые позволяют повысить вероятность идентификации блокировки до уровня 0,96–0,98 на интервалах 1–3 мс после наступления блокировки. Предложенные методы основаны на статистическом анализе уровня сигнала для определения момента начала блокировки. Достоверность методов подтверждена экспериментом на оборудовании ТНz-диапазона частот.
3. Разработаны методы моделирования для оценки вероятности блокировки в промышленных сценариях развертывания сетей 5G NR для подвижных блокирующих роботизированных устройств. Предложенные 3D-модели построены с использованием методов фотограмметрии и стохастической геометрии. Для нескольких типов роботизированных устройств, применяемых в промышленных сценариях, показано, что вероятность блокировки варьируется от 20-40 % в зависимости от типа роботизированного устройства и параметров сценария развертывания, что определяет требования к моделям в условиях фактора мобильности блокирующих устройств.
4. Разработаны две модели для оценки вероятности блокировки в сценариях применения летательных аппаратов: первая, учитывающая геометрию зданий городской застройки, вторая – с учетом геометрических и физических свойств типов атмосферных облаков при организации связи с участием воздушных судов. Численный эксперимент для сценария с участием воздушных судов выявил значительное влияние свойств облаков, погодных факторов и географического расположения на уровень принимаемой мощности для сигнала в диапазоне 30–50 дБ. Показано, что развертывание БС на крышах зданий в условиях плотной городской застройки позволяет снизить вероятность блокировки до 10 раз по сравнению с наземным развертыванием.
5. Предложена методология статистического анализа эффекта микромобильности в высокочастотных сетях, позволяющая определить интервал времени между

- запусками процедуры поиска луча на БС. Применение методологии показало, что для приложений потокового видео и телефонных вызовов, интервал времени можно увеличить до 1 с и более, что в 3–10 раз больше, чем длительность интервалов, рекомендованных международными стандартами 3GPP. Для приложений типа VR-просмотра и игр, характеризующихся высокой микромобильностью абонентского устройства, наилучшие значения интервала находятся в диапазоне от 100 до 500 мс. Достоверность результатов подтверждена измерениями на оборудовании THz диапазона. На основании измерений была также предложена методика идентификаций интервалов прерывания связи из-за эффекта микромобильности.
6. Разработан статистический метод идентификации приложений на оконечных устройствах, основанный на методах машинного обучения и не требующий передачи сигнальной информации по каналу связи. Метод обеспечивает вероятность идентификации типа приложения более 90 %. Он включает в себя статистические данные для машинного обучения, собранные на основе результатов эксперимента по эмуляции движения центра луча антенны.
 7. В условиях мультисвязности разработана модель для оценки времени, проводимого колесным устройством в состоянии устойчивой связи в городском развертывании систем 5G NR mmWave-диапазона длин волн. Применение модели позволило показать, что подключение дублирующей БС увеличивает время устойчивой связи на 50–100 %, в зависимости от плотности транспортного потока.
 8. С учетом мультисвязности между технологиями 5G NR на частотах, соответствующих mmWave-диапазону длин волн и диапазону суб-6 ГГц, разработана модель СМО абонентских устройств в условиях городского развертывания сети. В моделях также учитываются особенности обслуживания эластичного трафика. Показано, что применение режима мультисвязности приводит к снижению вероятности блокировки сессии на 10–30 %. В условиях снижения вероятности блокировки в сети NR в режиме мультисвязности скорость обслуживания эластичного трафика в сети суб-6 ГГц NR снижается в 2 раза на интервалах времени, сравнимых с длительностью блокировки.
 9. Разработана модель РеСМО абонентских устройств в условиях режима мультисвязности между технологиями 5G NR в миллиметровом и микроволновом диапазонах длин волн. Анализ модели и численный эксперимент показал, что применение технологии 5G NR микроволнового диапазона в режиме мультисвязности не приводит к снижению вероятности блокировки сессии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Бегишев, В.О. Сети 5G/6G: архитектура, технологии, методы анализа и расчета: монография / Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев, К.Е. Самуйлов, Е.А. Кучерявый. – М.: РУДН, 2022. – 516 с.: ил.

Учебно-методические пособия

2. Бегишев В.О. Модели и методы оценки характеристик сетей связи 5G / Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев, А.К. Самуйлов, К.Е. Самуйлов. М.: РУДН, 2020. – 95 с.
3. Бегишев В.О. Имитационное моделирование сетей и систем телекоммуникаций: учебное пособие / Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев, Э.С. Сопин. – М.: РУДН, 2024. – 110 с.: ил.

Работы, опубликованные в изданиях из списка ВАК (K1 и K2)

4. Бегишев В.О. Метод анализа вероятностных характеристик обслуживания пачечного трафика в системах NB-IoT / Н.В. Степанов, А.М. Тюрликов, В.О. Бегишев // Электросвязь. – 2022. – № 6. – С. 8–15.
5. Бегишев В.О. Оптимальные ассоциации устройств в сетях межмашинного взаимодействия стандартов NB-IoT и LTE-M / Н.В. Степанов, А.М. Тюрликов, В.О. Бегишев // Системы и средства информатики. – 2022. – Т. 32. – № 3. – С. 63–70.
6. Бегишев В.О. Моделирование настойчивого поведения пользователей в сетях 5G NR с адаптацией скорости и блокировками / Э.С. Сопин, А.Р. Маслов, В.С. Шоргин, В.О. Бегишев // Информатика и ее применения. – 2023. – Т. 17. – № 3. – С. 25-32.

Работы в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science

7. Begishev V. Quantifying the Impact of Guard Capacity on Session Continuity in 3GPP New Radio Systems / V. Begishev, D. Moltchanov, E. Sopin, A. Samuylov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, K. Samouylov // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – Vol. 68, no. 12. – P. 12345–12359.
8. Begishev V. Joint Use of Guard Capacity and Multiconnectivity for Improved Session Continuity in Millimeter-Wave 5G NR Systems / V. Begishev, E. Sopin, D. Moltchanov, R. Kovalchukov, A. Samuylov, S. Andreev, K. Samouylov // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – Vol. 70, no. 3. – P. 2657–2672.
9. Begishev V. Performance Analysis of Multi-Band Microwave and Millimeter-Wave Operation in 5G NR Systems / V. Begishev, E. Sopin, D. Moltchanov, R. Pirmagomedov, A. Samuylov, S. Andreev, K. Samouylov // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2021. – Vol. 20. – No. 6. – P. 3475–3490.

10. Begishev V. Performance Characterization and Traffic Protection in Street Multi-Band Millimeter-Wave and Microwave Deployments / V. Begishev, A. Samuylov, E. Lisovskaya, R. Kovalchukov, E. Sopin, Y. Koucheryavy // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2021. – Vol. 21. – No. 1. – P. 163–178.
11. Begishev V. Statistical Analysis and Modeling of User Micromobility for THz Cellular Communications / N. V. Stepanov, D. Moltchanov, V. Begishev, A. Turlikov, Y. Koucheryavy // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2022. – Vol. 71. – No. 1. – P. 725–738.
12. Begishev V. Propagation model for ground-to-aircraft communications in the terahertz band with cloud impairments / V. Doborshchuk, V. Begishev, K. Samouylov // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – No. 21. – P. 8022.
13. Begishev V. A Tutorial on Mathematical Modeling of 5G/6G Millimeter Wave and Terahertz Cellular Systems / D. Moltchanov, E. Sopin, V. Begishev, A. Samuylov, Y. Koucheryavy, K. Samouylov // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2022. – Vol. 24, No. 2. – P. 1072–1116.
14. Begishev V. Closed-Form UAV LoS Blockage Probability in Mixed Ground-and Rooftop-Mounted Urban mmWave NR Deployments / V. Begishev, D. Moltchanov, A. Gaidamaka, K. Samouylov // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 3. – P. 977.
15. Begishev V. Characterizing the Degree of LTE Involvement in Supporting Session Continuity in Street Deployment of NR Systems / A. Samuylov, D. Moltchanov, V. Begishev, K. Samouylov // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, Cham, 2019. – Vol. 11965. – P. 71–83.
16. Begishev V. Resource Queuing System with Preemptive Priority for Performance Analysis of 5G NR Systems / E. Sopin, V. Begishev, D. Moltchanov, A. Samuylov // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, Cham, 2020. – Vol. 12563. – P. 87–99.
17. Begishev V. Accuracy Assessment of User Micromobility Models for THz Cellular Systems / N. Stepanov, A. Turlikov, V. Begishev, Y. Koucheryavy, D. Moltchanov // *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems*. – 2021. – P. 37–42.
18. Begishev V. Evaluation of the New and Accepted Customers Blocking Probabilities in a Network of Resource Loss Systems / E. Sopin, V. Begishev, D. Moltchanov, A. Samuylov // *Communications in Computer and Information Science*. – Springer, Cham, 2022. – Vol. 1605. – P. 105–116.
19. Begishev V. Using Motion Sensors for Improved Beam Tracking in THz Communications with User Micromobility / S. Dugaeva, V. Begishev, E. Mokrov, K. Samouylov // *2022 International Conference on Modern Network Technologies (MoNeTec)*. – IEEE, 2022. – P. 1–8.

20. Begishev V. Dynamic Blockage in Indoor Reflection-Aided Sub-Terahertz Wireless Communications / A. Shurakov, P. Rozhkova, A. Khakimov, E. Mokrov, A. Prikhodko, V. Begishev, G. Gol'tsman // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 134677–134689.
21. Begishev V. Balancing the Data Transmission and Random Access Phases in 6G mMTC Radio Technologies / N. Stepanov, A. Turlikov, & V. Begishev // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27, no. 12. – P. 3419–3423.
22. Begishev V. The Impact of Rate Adaptation on User Performance in 5G/6G mmWave/Sub-THz Systems / E. Sopin, A. Maslov, V. Begishev, K. Samuyilov // IEEE Communications Letters. – 2023. – Vol. 27, no. 11. – P. 3137–3141.
23. Begishev V. Utilization of Machine Learning Algorithms to Identify User Applications / S. Dugaeva, V. Begishev, N. Stepanov // Lecture Notes in Computer Science. – Cham: Springer Nature Switzerland. – 2023. – Vol. 14123. – P. 410-422.
24. Begishev V. Blockage Attenuation and Duration Over Reflected Propagation Paths in Indoor Terahertz Deployments / A. Prikhodko, A. Khakimov, E. Mokrov, V. Begishev, A. Shurakov, G. Gol'tsman // Lecture Notes in Computer Science. – Cham: Springer Nature Switzerland. – 2023. – Vol. 14123. – P. 423-434.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

25. Бегишев В.О. Расчет эффективности механизма резервирования полосы пропускания в сетях доступа миллиметрового диапазона «Новое радио» / В.О. Бегишев, Э.С. Сопин, Д.А. Молчанов, А.К. Самуйлов // Свидетельство РФ на программу для ЭВМ № RU2020610576. – 16.01.2020.
26. Бегишев В.О. Имитационная модель поиска луча в системах связи терагерцового диапазона частот в условиях микромобильности абонентских терминалов / С.А. Дугаева, Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев // Свидетельство РФ на программу для ЭВМ № 2022661122. – 15.06.2022.
27. Бегишев В.О. Модель блокировки прямой видимости в миллиметровом диапазоне частот для приложений БПЛА / Д.А. Родина, Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев // Свидетельство РФ на программу для ЭВМ № 2022661567. – 24.06.2022.
28. Бегишев В.О. Модель блокировки прямой видимости в миллиметровом и терагерцовом диапазонах частот между самолетами и наземной базовой станцией / В.В. Доборщук, Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев // Свидетельство РФ на программу для ЭВМ № 2022661567. – 16.06.2022.
29. Бегишев В.О. Имитационная модель для расчета блокировки прямой видимости в миллиметровым диапазоне частот в промышленных условиях / А.А. Кондратьева,

Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев // Свидетельство РФ на программу для ЭВМ № 2022660348. – 09.06.2022.

30. Бегишев В.О. Модель для генерации траекторий микромобильности и расчета основных статистических признаков приложений для систем связи с направленными антеннами / С.А. Дугаева, Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев // Свидетельство РФ на программу для ЭВМ № 2023665735. – 19.07.2023.

Бегишев Вячеслав Олегович (Россия)

Методы анализа и расчета показателей качества высокочастотных сетей в условиях эффектов блокировки сигнала и микромобильности

В диссертации разработаны методы анализа и расчета показателей качества высокочастотных сетей в условиях эффектов блокировки сигнала и микромобильности. Проведены натурные эксперименты по анализу блокировки луча прямой видимости в помещениях, учтено влияние различных строительных материалов и разработаны методы повышения вероятности идентификации блокировки сигнала в терагерцевом диапазоне частот. Предложены модели для оценки вероятности блокировки в сценариях применения летательных аппаратов и подвижных блокирующих роботизированных устройств. Представлена методология статистического анализа эффекта микромобильности и идентификации приложений на оконечных устройствах с помощью машинного обучения. Разработаны модели для оценки времени, проводимого колесным устройством в состоянии устойчивой связи в городском развертывании систем 5G NR миллиметрового диапазона длин волн с учетом мультисвязности.

Begishev Vyacheslav O. (Russia)

Analysys and Assessment of the Systems Operating in the Extremely-High Frequency Band under Blockage and Micromobility Impairments

The dissertation developed methods for analyzing and calculating the quality indicators of extremely-high frequency networks under the conditions of signal blocking and micromobility effects. Field experiments were conducted to analyze the blocking of the line-of-sight beam in rooms. The influence of various building materials was considered, and methods were developed to increase the probability of identifying signal blocking in the terahertz frequency range. Models are proposed to assess the probability of blocking in scenarios for the use of aircraft and mobile robotic devices. A methodology for statistical analysis of micromobility and identification of applications using machine learning is presented. The paper also presents models for estimating the time spent by wheeled devices in a stable communication state in urban deployments of 5G NR systems, taking into account multi-connectivity in the millimeter-wave frequency range.