УДК 621.396.41
DOI 10.26732/j.st.2026.2.07

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕНАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ: СИМУЛЯЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В СЕТЕВОМ СИМУЛЯТОРЕ

А. Ю. Ларионов✉
Национальный исследовательский университет ИТМО
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассматривается интеграция сетей пятого поколения с неназемными сетями и анализируется возможность применения спутниковых технологий для расширения существующей телекоммуникационной инфраструктуры. Особое внимание уделено использованию миллиметровых волн, обеспечивающих высокую пропускную способность и низкую задержку, что позволяет создавать эффективные и высокоскоростные каналы связи. Работа описывает ключевые характеристики неназемных сетей, а также их потенциал для повышения качества обслуживания пользователей в сетях пятого и будущих поколений. Основное внимание уделено моделированию различных сценариев работы неназемных сетей с помощью симулятора с открытым исходным кодом Network Simulator 3 (NS-3), что позволяет тестировать новые сетевые концепции и протоколы без необходимости проведения дорогостоящих полевых испытаний. Полученные результаты демонстрируют, что интеграция сетей пятого поколения с неназемными сетями может значительно расширить покрытие, улучшить надежность и пропускную способность сетей пятого поколения.

Ключевые слова: неназемная сеть, NTN, спутниковая связь, миллиметровый диапазон, моделирование сетей, пропускная способность.

Поступила в редакцию: 03.04.2026. Принята к печати: 26.06.2026.

Введение

За последние годы интерес к интеграции сетей пятого поколения (5G) и неназемных сетей Non-Terrestrial Networks (NTN) существенно возрос, что привело к активному развитию как теоретических исследований, так и практических разработок в данной области [1]. Важным этапом стало включение поддержки NTN в спецификации 5G, утверждённое организацией 3GPP в релизе Release-17. Это решение определило направление дальнейшего развития мобильных сетей, в которых спутниковый сегмент рассматривается как один из ключевых элементов телекоммуникационной инфраструктуры будущего.

Одним из значимых преимуществ сетей 5G является возможность использования диапазона миллиметровых волн (mmWave) [2; 3]. По сравнению с традиционными частотными диапазонами такие системы способны обеспечивать более высокую пропускную способность и меньшие задержки передачи данных. Благодаря этому открываются дополнительные возможности для обслуживания растущего объема мобильного трафика и повышения эффективности сетевой инфраструктуры.

Появление и развитие технологий NTN [4] формирует новые требования к сетям связи, связанные с обеспечением необходимой пропускной способности, широкого покрытия и высокой надежности сервисов. В этой связи особую актуальность приобретает использование спутниковых систем в качестве дополнения к существующим наземным сетям. Такой подход особенно востребован в удаленных, труднодоступных и малонаселенных районах, где развертывание традиционной инфраструктуры связано со значительными экономическими затратами.

Неназемные сети способны обеспечить доступ к услугам связи практически независимо от гео-

✉ larionovaleks97@mail.ru

© Статья распространяется под лицензией Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

графического положения. Широкая зона покрытия позволяет повысить доступность сетевых сервисов, поддерживать непрерывность обслуживания и обеспечивать масштабируемость предоставляемых услуг [5]. В данной работе рассматриваются основные характеристики NTN, стандартизованные 3GPP, а также анализируются возможности их применения для удовлетворения требований пользователей в сетях 5G и системах связи следующих поколений.

Разработка гибкого инструмента для моделирования сценариев функционирования неназемных сетей (NTN) является важной задачей при исследовании телекоммуникационной инфраструктуры. Такой инструмент позволяет оценивать различные архитектурные решения и сетевые механизмы, снижая необходимость проведения дорогостоящих натурных экспериментов и ускоряя процесс исследований [6].

Использование симулятора с открытым исходным кодом, такого как NS-3, позволяет анализировать поведение сети в различных условиях. С его помощью можно моделировать широкий спектр сценариев, включая особенности работы протоколов и моделей передачи данных. Это дает возможность детальнее изучить NTN и оценить их применимость в различных сетевых сценариях [7; 8]. В результате подобный подход способствует разработке более эффективных решений и совершенствованию телекоммуникационных систем.

Цель данной работы – имитационное моделирование сценариев 5G NTN с последующей оценкой их эффективности.

Основные задачи: выполнить анализ существующей архитектуры 5G, а также программных модулей для NS-3. Исследовать ключевые ограничения и факторы, влияющие на качество спутниковой связи, исследовать модели канала 3GPP NTN и 3GPP mmWave.

1. Кратко о 5G NR

Сети 5G проектируются для поддержки широкого спектра функций и требований различных категорий пользователей. Важной особенностью данной технологии является поддержка отраслевых сценариев использования, что позволяет адаптировать сетевые ресурсы под конкретные приложения и сервисы, сохраняя при этом гибкость и масштабируемость инфраструктуры [9; 10].

Согласно спецификациям 5G, выделяют три основных сценария использования: усовершенствованный мобильный широкополосный доступ (eMBB), массовые межмашинные коммуникации (mMTC) и сверхнадёжные коммуникации с низкой задержкой (URLLC) [11–14].

Системы NTN, включая спутниковые и высотные платформы, обеспечивают покрытие в регионах, где развертывание наземных базовых станций невозможно или экономически нецелесообразно. Это способствует снижению цифрового неравенства за счет расширения доступа к высокоскоростным телекоммуникационным услугам для населения и бизнеса в удаленных районах [15; 16].

Учитывая растущий спрос на увеличение пропускной способности сетей, в архитектуре 5G предусмотрено использование расширенной полосы частот в диапазоне миллиметровых волн (mmWave). Вместе с тем распространение радиосигнала в данном диапазоне характеризуется значительными потерями на трассе распространения.

В технологии mmWave широко применяется формирование диаграммы направленности с использованием антенных решеток. Малые длины волн миллиметрового диапазона, а также развитие маломощных КМОП (CMOS) радиочастотных схем позволяют интегрировать большое число миниатюрных антенн в компактные решетки. Такие системы обеспечивают высокий коэффициент усиления и возможность электронного управления направлением излучения [17].

Сигналы в миллиметровом диапазоне характеризуются более выраженным эффектом затенения (shadowing) по сравнению с сигналами на более низких частотах. Ослабление сигнала, создаваемое строительными конструкциями, может достигать 40–80 дБ, тогда как влияние человеческого тела составляет порядка 20–35 дБ, что приводит к сокращению зоны покрытия и снижению дальности устойчивого приема [18].

Малая длина волны миллиметрового диапазона позволяет размещать большое число антенн в ограниченном пространстве и формировать несколько независимых каналов передачи данных. Это является основой технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output) [19; 20], которая использует многоантенные конфигурации на базовых станциях и пользовательских устройствах для повышения пропускной способности сети. В отличие от традиционных реализаций MIMO, ограниченных конфигурациями 2×2 или 4×4, использование mmWave позволяет реализовывать массивы антенн размером 32×32 и более. Это обеспечивает эффективное формирование направленных лучей и повышение спектральной эффективности, что в совокупности увеличивает пропускную способность сетей 5G [21].

2. Основные компоненты канала передачи для моделирования сети 5G

Организации по стандартизации активно ведут разработку и обновление спецификаций и инструментов, предназначенных для корректного моделирования и оценки характеристик каналов мил-

лиметрового диапазона в сетях 5G. Особое внимание уделяется построению детализированных моделей радиоканала, которые являются ключевым элементом при анализе производительности таких систем.

В данном разделе представлены основные компоненты, учитываемые при моделировании сетей 5G, которые также могут быть использованы при формировании моделей канала NTN.

2.1. Анализ сценариев канала связи и факторов влияния на его состояние

При оценке производительности сетей и анализе сценариев использования необходимо учитывать условия функционирования сети. 3GPP определяет ряд типовых сценариев эксплуатации, применимых к различным средам, которые представлены в таблице 1.

Корректная оценка состояния радиоканала во многом определяется наличием прямой видимости между узлами связи. Режим Line of Sight (LOS) характеризуется прямым распространением сигнала от передатчика к приемнику без отражений и проникновения через препятствия. Противоположным состоянием является Non-Line of Sight (NLOS), при котором распространение сигнала происходит в условиях отсутствия прямой видимости из-за наличия препятствий, таких как здания или другие объекты [21; 22].

2.2. Потери сигнала при распространении в свободном пространстве

Потеря связи в свободном пространстве является важным элементом системы беспроводной связи, приводящим к снижению мощности сигнала. Если предположить идеальные условия, при которых единственным фактором ослабления сигнала являются только потери на пути в свободном пространстве, то можно рассчитать принимаемую мощность на определенной приемной антенне, используя закон Фрииса.

Закон Фрииса позволяет вычислить принимаемую мощность исходя из передающей мощности, коэффициентов усиления антенн, расстояния между антеннами и длины волны сигнала. Формула закона Фрииса выглядит следующим образом [23]:

Таблица 1

Сценарии функционирования сетей 5G NTN

Тип застройки	Плотная городская	Городская	Пригородная	Сельская
Цель	Обеспечение связи в условиях сверхплотной многоэтажной городской застройки с преобладанием отсутствия прямой видимости и выраженными эффектами экранирования и многолучевого распространения	Обеспечение связи в условиях городской застройки с малым радиусом покрытия и высокой вероятностью отсутствия прямой видимости	Обеспечение связи в пригородных зонах с низкой плотностью застройки и высокой вероятностью прямой видимости	Обеспечение связи в условиях открытых пространств с минимальными препятствиями и максимальной дальностью связи
Плотность застройки	Высокая	Средняя	Низкая	Очень низкая
Высота зданий	Средняя (5–10 эт.)	Средняя/высокая	Низкая (1–3 эт.)	Очень низкая
Высота базовой станции	~10 м	~25 м	15–30 м	35 м и выше
Радиус покрытия	Малый	Средний	Средний–большой	Большой
Вероятность LOS	Низкая–средняя	Средняя	Высокая	Очень высокая
Доминирующий режим	NLOS	LOS / NLOS	LOS	LOS
Потери распространения	Высокие	Средние	Умеренные	Низкие
Отражения / дифракция	Очень сильные	Сильные	Умеренные	Слабые
Затенение (shadowing)	Сильное	Среднее	Низкое	Очень низкое
Мобильность пользовательского оборудования	Низкая	Средняя	Средняя	Средняя–высокая
Пригодность для NTN	Ограниченная	Умеренная	Хорошая	Очень высокая

$$\frac{P_r}{P_r} = G_t G_r (\frac{\lambda}{4\pi d})^2, \quad (1)$$

где P_r – принимаемая мощность, P_t – передаваемая мощность, G_t – коэффициент усиления передающей антенны, G_r – коэффициент усиления приемной антенны, λ – длина волны, d – расстояние между передающей и приемной антеннами.

Коэффициент усиления обычной антенны описывается формулой [24]:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}, \quad (2)$$

где A_{eff} – это эффективная площадь антенны. Из (1) и (2) можно определить, что ослабление сигнала в свободном пространстве увеличивается с повышением частоты, но это компенсируется дополнительным усилением антенны, поскольку усиление антенны также увеличивается с частотой. Таким образом, можно добиться того, что применение более высоких частот не влечет за собой потерь при распространении в свободном пространстве.

Если предполагается применение изотропных антенн, применяется уравнение ослабления сигнала в свободном пространстве в логарифмической форме:

$$FSPL_{dB} = A + B\log_{10^d} + C\log_{10} f, \quad (3)$$

где A и B параметры, которые изменяются в зависимости от сценария из таблицы 1, d – это расстояние, а f – частота передачи. Параметр B учитывает зависимость от расстояния между приемником и передатчиком, C определяет связь с несущей частотой, а A получает различные значения в зависимости от сценария и состояния LOS/NLOS. Дополнительно используется параметр, называемый точкой разрыва d_{BP}, который определяется частотой и высотой базовой станции и пользовательского оборудования и необходим для корректного расчета значения потерь связи в свободном пространстве (FSPLdB) [25].

Формула (3) является первым шагом в расчете бюджета канала (link budget) в модели 3GPP [26].

3. Обзор NTN

К неназемным сетям (NTN) относятся спутниковые системы связи, высотные платформы, беспилотные летательные аппараты, а также гибридные сети типа «воздух–земля». Спутниковые системы связи могут быть реализованы на различных орбитах, включая низкую (LEO), среднюю (MEO) и геостационарную (GEO) орбиты.

Геостационарная орбита (GEO) обеспечивает важное преимущество: спутник сохраняет фиксированное положение относительно поверхности Земли и постоянно обслуживает одну и ту же область покрытия. Это позволяет наземным терминалам использовать одну и ту же спутниковую платформу для обеспечения связи без необходимости перенастройки на другие спутники. Спутники на геостационарной орбите располагаются на высоте более 35 000 км, что обеспечивает покрытие больших территорий. Вместе с тем значительное расстояние приводит к увеличению задержки распространения сигнала и усилению потерь на трассе передачи. В то же время такие спутники отличаются высокой стабильностью орбиты и длительным сроком эксплуатации по сравнению с аппаратами на более низких орбитах.

Спутники на низкой околоземной орбите (LEO) функционируют на высотах примерно от 300 до 2000 км. В отличие от спутников на геостационарной орбите, они не ограничены экваториальной плоскостью и могут иметь различные наклонения орбит, что позволяет формировать глобальное покрытие Земли. Орбитальная скорость LEO-спутников составляет порядка 7,4 км/с, а период обращения вокруг Земли – около 90 минут. Зона покрытия одного спутника ограничена и составляет от нескольких сотен тысяч до миллионов квадратных километров в зависимости от высоты орбиты и угла обзора, что требует формирования крупных спутниковых группировок для обеспечения непрерывного покрытия больших территорий. При этом относительно низкая стоимость выведения спутников на орбиту делает возможным развертывание масштабных LEO-систем. Существенным ограничением является атмосферное торможение, которое влияет на срок активного существования спутников и приводит к типичным значениям службы порядка 3–10 лет.

Спутники, находящиеся на средней орбите (MEO), расположены на высоте от 2 000 до 35 786 км, с минимальным периодом оборота 2 часа, который может увеличиваться до 24 часов. Площадь покрытия спутников на MEO варьируется между покрытиями LEO и GEO, так же как и значения задержки и потери сигнала из-за ослабления [27–29].

В стандартах 3GPP неназемные сети (NTN) рассматриваются как расширение архитектуры 5G NR. Ключевой принцип заключается в сохранении базовой архитектуры 5G при использовании NTN в качестве альтернативного вида радиодоступа наряду с традиционными наземными сетями.

Архитектура 5G NTN логически разделяется на три сегмента.

Космический сегмент включает спутники, функционирующие на низкой, средней и геостационарной орбитах (LEO, MEO, GEO), а также полезную нагрузку и антенные системы. В зависимости от сценария применения спутник может выполнять функцию простой радиочастотной ретрансляции либо осуществлять обработку сигна-

лов на борту (regenerative payload), включая элементы обработки протоколов радиодоступа.

Наземный сегмент включает шлюзовые станции (Gateway Earth Stations), элементы gNB, а также узлы подключения к 5G Core. Он обеспечивает управление сетевыми ресурсами, маршрутизацию трафика и взаимодействие с ядром сети.

Пользовательский сегмент представлен терминальными устройствами, оснащенными NTN-совместимыми модемами и, как правило, GNSS-приемниками, используемыми для позиционирования и компенсации доплеровского смещения.

С архитектурной точки зрения в 5G NTN различают два базовых варианта построения сети, определяемых типом полезной нагрузки спутника.

В архитектуре с прозрачной полезной нагрузкой спутник выполняет функции радиочастотного ретранслятора без демодуляции и обработки сигналов на уровне протоколов 5G NR. В этом случае все функции gNB размещаются в наземном сегменте. Данный подход позволяет существенно снизить сложность спутниковой платформы и упростить её эксплуатацию, однако приводит к увеличению сквозной задержки и росту нагрузки на фидерные линии связи. Это, в свою очередь, ограничивает масштабируемость системы и снижает эффективность управления радиоресурсами [30].

В архитектуре с регенеративной полезной нагрузкой часть функций gNB, включая физический и канальный уровни, переносится на борт спутника, тогда как верхние уровни протокольного стека остаются в наземном сегменте или в ядре сети. Такой подход позволяет снизить сквозные задержки, локализовать процедуры управления радиоресурсами и уменьшить нагрузку на фидерные линии связи. Вместе с тем он существенно повышает сложность полезной нагрузки и накладывает жесткие ограничения на энергопотребление и вычислительные ресурсы спутниковой платформы.

Выбор архитектуры NTN связан с концепцией функционального разделения gNB на централизованные и распределенные компоненты. В условиях NTN точка функционального split определяется допустимой задержкой фидерной линии и требованиями к реализации механизма HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), обеспечивающего надежную передачу данных за счет повторной передачи и подтверждения приема. Ключевым ограничением является необходимость обеспечения того, чтобы задержка между распределенными и централизованными функциями gNB оставалась ниже допустимого времени обработки HARQ. В противном случае низкоуровневые варианты функционального разделения становятся ограниченно применимыми в прозрачных архитектурах, что объясняет растущий интерес к регенеративным решениям, особенно в системах на низкой околоземной орбите [31].

Особое архитектурное значение в 5G NTN имеет организация фидерных линий связи между спутниками и наземными шлюзами. Такие линии обычно реализуются в Ka- и Q/V-диапазонах и требуют применения многошлюзовых архитектур для повышения надежности и устойчивости к атмосферным замираниям. Анализ существующих исследований [19–21] показывает, что архитектура фидерной инфраструктуры оказывает существенное влияние на экономическую эффективность неназемных сетей. На уровне радиоинтерфейса традиционная сотовая структура в NTN заменяется динамически формируемыми лучами, создаваемыми фазированными антенно-решетчатыми системами. Эти лучи перемещаются относительно поверхности Земли вслед за орбитальным движением спутника.

В 5G NTN процедуры управления мобильностью включают хэндоверы между лучами, спутниками и шлюзовыми станциями. Частота таких хэндоверов в значительной степени определяется орбитальной динамикой спутников, а не перемещением пользователей. Исследования [11; 12] показывают, что спутниково-обусловленная мобильность становится основным источником сигнальной нагрузки в NTN и требует специализированной оптимизации на уровне сети радиодоступа (RAN). На рисунке 1 представлена многоуровневая архитектура интегрированной сети спутниковой, воздушной и наземной связи, включающая спутниковый сегмент, платформы HAPS (High Altitude Platform Station), авиационные и беспилотные платформы, а также наземную инфраструктуру.

4. Моделирование и его результат

Симулятор NS-3 представляет собой широко используемую платформу для моделирования сетевых систем и проведения исследований в области телекоммуникаций. Его возможности охватывают моделирование различных аспектов сетей, включая протоколы передачи данных, механизмы управления ресурсами и элементы сетевой инфраструктуры.

NS-3 построен на объектно-ориентированной архитектуре, обеспечивающей представление сетевых компонентов и процессов в виде взаимосвязанных программных объектов. Такой подход упрощает моделирование сложных сетевых взаимодействий и повышает гибкость при разработке исследовательских сценариев.

NS-3 поддерживает разнообразные протоколы, такие как TCP, UDP, HTTP, а также специфичные для 5G протоколы, включая NR (New Radio) и модели для NTN.

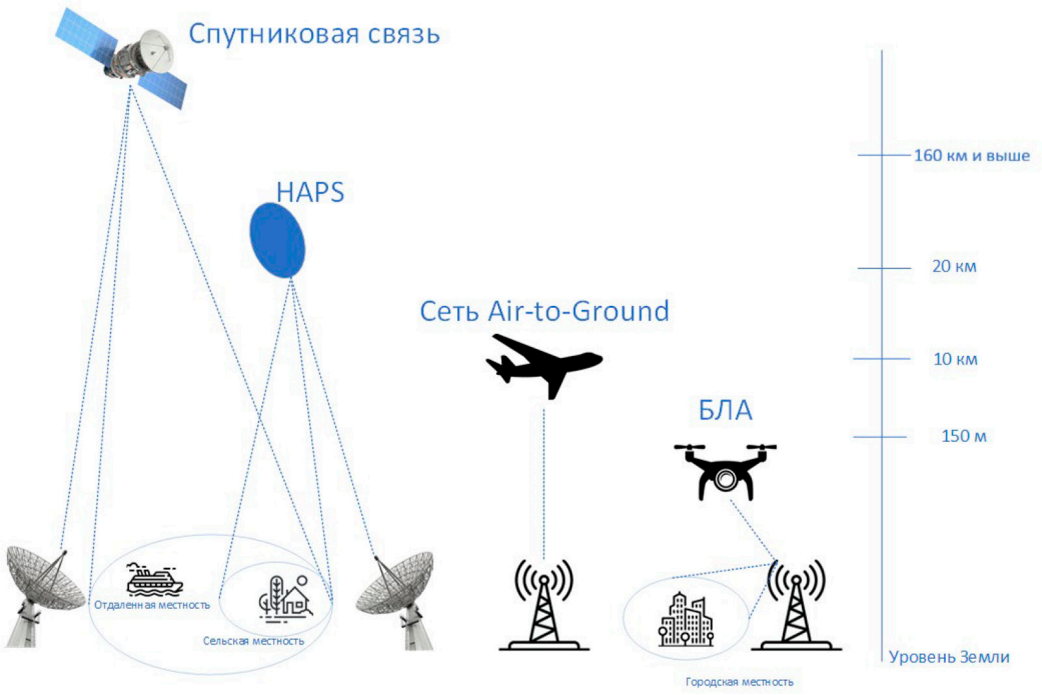


Рисунок 1. Многоуровневая структура сетей NTN

Симулятор содержит набор моделей радиоканала, предназначенных для воспроизведения условий распространения сигнала в различных сценариях связи, включая наземные и неназемные сети (NTN). Эти модели учитывают такие особенности, как потери при распространении, многолучевость, затенение, а также значительные доплеровские смещения, характерные для спутниковых систем связи.

4.1. Особенности моделирования 5G NTN в NS-3

Моделирование неназемных сетей (NTN) в среде NS-3 направлено на исследование и оценку характеристик спутниковых систем связи, функционирующих на низких (LEO), средних (MEO) и геостационарных (GEO) орбитах. При построении таких моделей необходимо учитывать особенности распространения радиосигнала, обусловленные орбитальным движением спутников, значительными расстояниями передачи, задержками распространения и выраженным доплеровским смещением.

Модель канала NTN в NS-3 реализована на основе пространственной модели радиоканала 3GPP. Интеграция NTN выполнена посредством расширения существующих классов симулятора и добавления специализированных модулей, позволяющих учитывать параметры спутникового канала и орбитальную динамику без изменения базовой архитектуры NS-3.

Разработка была ориентирована на минимальное изменение базовой архитектуры NS-3 с целью сохранения стабильности существующих компонентов. При этом для реализации и оптимизации модели канала NTN потребовалось внесение ограниченных изменений в структуру исходного кода симулятора.

В данной реализации модели канала NTN для симулятора NS-3 был внесен ряд изменений в класс ThreeGppChannelModel, который отвечает за вычисление маломасштабных параметров, описанных в документации 3GPP. Моделирование канала для спутниковых сетей потребовало адаптации существующих алгоритмов для учета специфики NTN, таких как влияние частотного диапазона, углов наклона и условий видимости (LOS/NLOS), а также разнообразных сценариев работы спутниковых систем. Эти изменения позволяют более точно моделировать поведение канала в реальных условиях эксплуатации.

Для учета множества факторов, определяющих маломасштабные параметры, была использована вложенная структура карт, что позволяет эффективно хранить и обрабатывать более 30 различных сценариев. Каждый сценарий зависит от частотного диапазона, угла наклона, типа видимости и сценария, что делает расчет канала гораздо более точным и адаптированным к условиям реальной спутниковой связи. К примеру, для каждого сценария создаются две карты: для случаев LOS и NLOS, что позволяет точно учитывать особенности распространения сигнала в этих условиях.

Метод GetThreeGppTable() был дополнительно изменен для учета модели движения узлов передатчика и приемника, что стало необходимым для корректного расчета маломасштабных параметров с учетом угла наклона. Это дополнение позволяет

более точно учитывать геометрические особенности канала и условия видимости в реальных сценариях. Также для сценариев с меньшим количеством кластеров были добавлены дополнительные масштабирующие факторы, что также повышает точность расчетов.

Для более точных расчетов в моделировании телекоммуникационных систем, таких как 5G и NTN, применяется геоцентрическая декартовая система координат (ECEF), рекомендуемая 3GPP.

Класс GeographicPositions в симуляторе NS-3 важен в точном позиционировании объектов и преобразовании координат, что является необходимым для корректного моделирования сетевых взаимодействий в различных системах координат. Также он решает задачу преобразования между географической системой координат и топоцентрической системой координат (East-North-Up, ENU), которая используется для локализации объектов относительно фиксированной точки на Земле. Для реализации этого преобразования в NS-3 использованы методы GeographicToTopocentricCoordinates и TopocentricToGeographicCoordinates, которые обеспечивают точный перевод координат между географической и топоцентрической системами.

Для реализации модели канала NTN в симуляторе NS-3 был разработан новый класс NTNChannelModel, который значительно расширяет возможности симулятора для работы с условиями канала в контексте спутниковых сетей. Класс ChannelCondition, являющийся частью этой реализации, хранит состояние канала, а интерфейс ChannelModel может быть расширен для реализации различных специфичных условий канала. Главным методом класса является GetChannelCondition, который, принимая две модели мобильности, возвращает указатель на состояние канала.

Классы были разработаны для того, чтобы учитывать особенности распространения сигналов и изменения канала в зависимости от типа местности: NTNDenseUrbanModel – модель для плотных городских зон, NTNUrbanModel – модель для городских зон, NTNSuburbanModel – модель для пригородных зон, NTNRuralModel – модель для сельских зон.

Метод GetChannelCondition в этих классах вычисляет состояние канала с использованием алгоритма и сохраняет его вместе с временем генерации для последующего использования.

В рамках реализации модели потерь распространения канала NTN в NS-3 был создан класс NTNLossModel, который расширяет базовый класс ThreeGppPropagationLossModel.

Основной задачей этих классов является вычисление общих потерь распространения, учитывающих атмосферные явления. Ключевым методом для расчета потерь пути является CalcPower, который вычисляет полученную мощность на основе позиций передающих и принимающих узлов. Для вычислений используются методы GetLossLos, GetLossNlos, GetShadowing и GetShadowingStd, которые позволяют учитывать потери в условиях прямой видимости (LOS) и без прямой видимости (NLOS).

Также был добавлен класс PositionModel, который решает задачи вычисления угла подъема, необходимого для оценки параметров канала.

Класс PositionModel хранит положение объекта в виде географических координат через переменную m_position. Важным аспектом является возможность преобразования геоцентрических декартовых координат в планарные декартовые координаты, используемые в NS-3, с помощью методов базового класса MobilityModel.

Внедрение доработанной модели NTNThreeGppExt включает создание новых классов для более точного моделирования канала NTN и обеспечивает более реалистичное использование географических координат, точные расчеты углов подъема и потерь пути.

4.2. Параметры моделирования

Параметры, используемые в симуляциях, включают характеристики спутников и терминалов (таблица 2).

4.3. Эксперименты

Эксперимент направлен на исследование влияния угла места спутника на характеристики радиоканала в Ku-диапазоне, включая потери сигнала и отношение сигнал/шум (SNR). Измерения проводятся для спутника, расположенного на фиксированной орбите.

Результаты показаны на рисунке 2.

При изменении угла места спутника значения SNR изменяются вследствие увеличения расстояния между терминалом и спутником при уменьшении угла возвышения, а также изменения коэффициента усиления антенны, обусловленного ее диаграммой направленности.

1. При уменьшении угла места наблюдается ухудшение качества сигнала, связанное с изменением коэффициента усиления спутниковой антенны вне основного лепестка диаграммы направленности. Данный эффект определяется шириной луча по уровню половинной мощности (HPBW), обозначенной как $\theta_{3\text{dB}}$, спутниковой антенны:

$$\theta_{3dB} = \frac{70\lambda}{d},$$

где λ – длина волны, d – диаметр антенны.

2. С уменьшением угла места от 90 до 10° вносимые потери возрастают вследствие увеличения наклонной дальности между спутником и терми-

Таблица 2

Характеристики спутников и абонентских терминалов

Диапазон частот		S-диапазон (2–4 ГГц)	
Тип орбиты		LEO (низкая орбита Земли) на высоте до 1200 км	
Тип терминала		Носимые устройства и VSAT-станции с антеннами многоканальной поляризации, обеспечивающими параллельную передачу и прием сигналов в различных поляризационных режимах	
Параметры каналов	Downlink	Эквивалентная апертура антенны	0,05 м
		Плотность эффективной изотропной радиированной мощности (EIRP)	70 дБм
		Максимальный коэффициент усиления антенны	40 дБи
	Uplink	Эквивалентная апертура антенны	0,02 м
		Плотность эффективной изотропной радиированной мощности (EIRP)	33 дБм
		Максимальный коэффициент усиления антенны	10 дБи
Допущения: В работе рассматриваются только терминалы, принимающие и передающие сигнал, что приводит к тому, что мощность помехи всегда равна нулю. Следовательно, используется только отношение сигнал/шум (SNR). Допускается, что передающие и принимающие терминалы остаются неподвижными в любой момент времени, что исключает эффект Доплера, вызванный движением узлов			

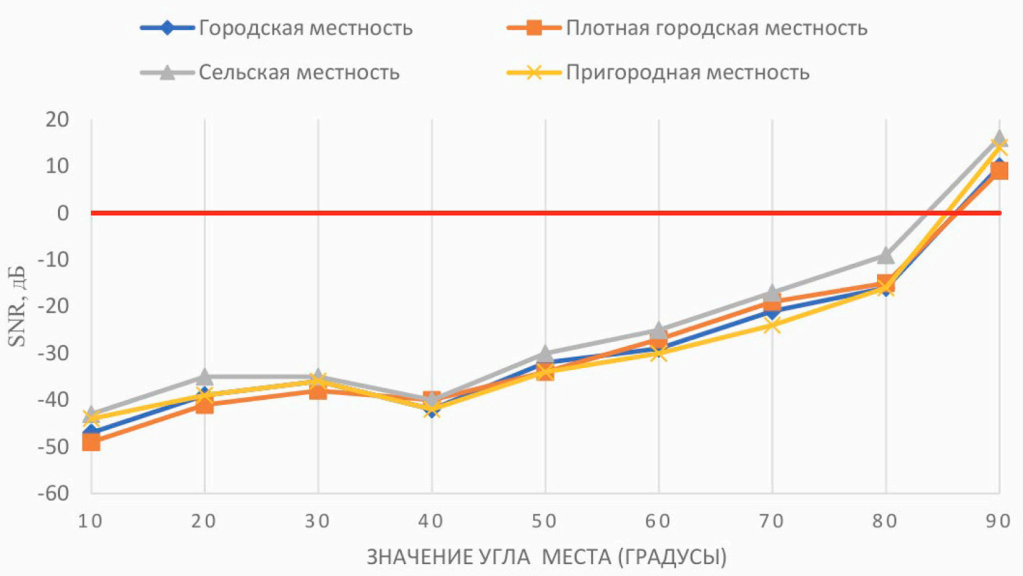


Рисунок 2. Зависимость отношения сигнал/шум от угла места

налом, что приводит к росту потерь распространения и дополнительному затуханию сигнала.

Как видно по полученным значениям, ориентировочное соотношение сигнал/шум 0 дБ [32] для базовой связи достигается при величине угла места примерно от 85 до 90 градусов, т. е. для поддержания стабильного соединения спутник должен находиться практически над абонентским устройством.

В следующем эксперименте исследуется влияние высоты орбиты спутника на параметры связи для нисходящего (DL) и восходящего (UL) каналов. В отличие от предыдущего сценария, где анализ проводился при фиксированной высоте спутника и изменяющемся угле места, в данном случае высота спутника варьируется в диапазоне от 200 до 1800 км. Параметры передачи, включая мощность передатчика и характеристики антенн, соответствуют значениям, рекомендованным для рассматриваемого диапазона частот и типа орбиты. Для всех положений спутника используются одинаковые параметры антенн. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

Восходящий канал (UL) показывает, что использование антенн VSAT с более высоким уровнем усиления и мощности помогает поддерживать значение SNR выше ориентировочного порога сиг-

$$\theta_{3dB} = \frac{70\lambda}{d},$$

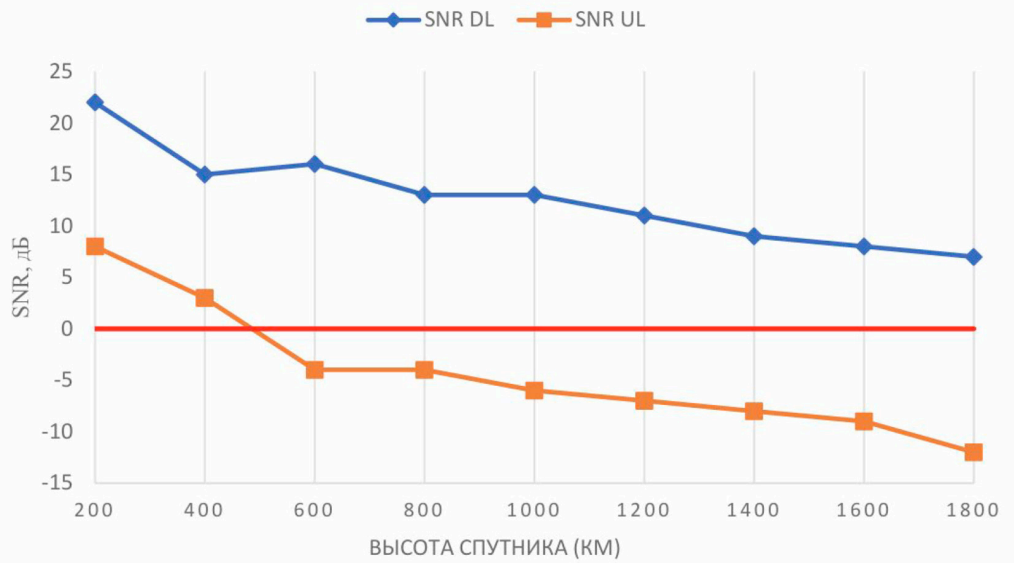


Рисунок 3. Зависимость отношения сигнал/шум от высоты спутника

нал/шум 0 дБ для базовой связи на высотах спутников приблизительно до 500 километров. Более высокие значения SNR в нисходящем канале (DL) по сравнению с восходящим (UL) обусловлены энергетической асимметрией линии связи: спутник обладает значительно большей излучаемой мощностью и коэффициентом усиления антенны, чем пользовательский терминал. В результате UL является ограничивающим звеном по энергетическому бюджету канала.

Моделирование полного стека 5G NR для оценки пропускной способности на уровне приложения

В этом эксперименте моделируется полный набор 5G NR для оценки возможной пропускной способности на уровне приложения, доступной при различных конфигурациях. В качестве метрик рассматриваются пропускная способность на уровне приложения и коэффициент потерь пакетов, который определяется как отношение количества пакетов, не достигших назначения, к общему количеству отправленных пакетов.

Результаты, полученные в ходе моделирования, приведены в таблице 3.

Все протестированные сценарии демонстрируют высокий коэффициент потерь пакетов (>0,3), что может объясняться влиянием мобильности терминалов на устойчивость радиоканала.

Важно отметить, что высокий коэффициент усиления антенн способствует улучшению качества связи за счет увеличения мощности принимаемого сигнала и повышения отношения сигнал/шум, что снижает вероятность ошибок передачи и потерь пакетов. Кроме того, использование таких антенн повышает устойчивость соединения в условиях высокой мобильности терминалов, компенсируя ухудшение радиоканала, вызванное изменением расстояния, затуханием сигнала и быстрыми изменениями условий распространения. Эти результаты подчеркивают важность правильного выбора мощности передачи и усиления антенн, особенно при работе в высокочастотных диапазонах и динамичных условиях, таких как 5G NTN для глобальной связи.

Предпочтительный сценарий для установления спутниковой интернет-связи – это спутник на орбите LEO на высоте от 200 до 500 км, с антенной на основе фазированной антенной решетки с высоким коэффициентом усиления на наземном терминале и спутниковых терминалах.

Спутники на более высоких орбитах обладают преимуществом в виде большего покрытия на Земле и более долгого срока службы, однако требуют большей мощности передачи и/или антенн с более высоким усилением.

Таблица 3

Результаты моделирования

Сценарий	LEO-300	LEO-300	LEO-500
EIRP	33 дБм	36 дБм	39 дБм
Пропускная способность	3,21 Мбит/с	4,12 Мбит/с	5,54 Мбит/с
Коэффициент потери пакетов	0,67	0,45	0,36

Заключение

В данной работе предложена реализация модели канала NTN по стандартам 3GPP для симулятора NS-3, которая позволяет воспроизводить процессы распространения сигнала в негеостационарных спутниковых сетях и проводить оценку производительности систем связи в различных сценариях эксплуатации.

Рассмотрены основные характеристики модели канала для 5G. Далее представлен обзор NTN с акцентом на возможные сценарии применения и улучшения, которые данные технологии способны внести в современные и перспективные сети 5G, включая расширение зоны покрытия, повышение устойчивости связи и обеспечение доступа в труднодоступных регионах.

Проанализирована модель канала NTN, предоставленная 3GPP, включая сравнение с моделью канала для наземных сетей, с акцентом на дополнительные факторы, влияющие на проектирование коммуникационных систем за пределами наземной инфраструктуры. Показано, что для NTN-сценариев существенное значение имеют большие задержки распространения, высокая мобильность узлов и изменчивость условий радиоканала. Кроме того, спецификации 3GPP NTN также учитывают влияние доплеровских смещений. Анализ влияния доплеровских смещений выходит за рамки настоящего исследования и будет рассмотрен в дальнейших работах.

Реализована модель канала NTN в NS-3.

Представлены результаты моделирования, показывающие, что NTN может стать полезным инструментом создания глобального бесшовного покрытия и расширения существующих и будущих сетевых инфраструктур.

В дальнейшей работе будет проводиться совершенствование модели 5G NTN в NS-3 и исследование большего количества сценариев функционирования сети. Будут исследоваться пути возможного повышения производительности сетей 5G NTN.

Список литературы

[1] 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; WG1 (SA1). Study on using Satellite Access in 5G: Technical Report 22.822; Release 16; SP-170702. – Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2017–2018.
[2] Sun Y. et al. A survey of mmWave backscatter: Applications, platforms, and technologies // ACM Computing Surveys. 2025. vol. 57. no. 9. pp. 1–36.
[3] Mezzavilla M. et al. End-to-end simulation of 5G mmWave networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. vol. 20. no. 3. pp. 2237–2263.
[4] Vanelli-Coralli A. et al. 5G and beyond 5G non-terrestrial networks: Trends and research challenges //2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF). 2020. pp. 163–169.
[5] Xia X. 5G NTN: Standard Development, Key Technologies and Future Considerations // 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2024. pp. 236–241.
[6] Lacava A. et al. ns-o-ran: Simulating o-ran 5g systems in NS-3 // Proceedings of the 2023 Workshop on NS-3. 2023. pp. 35–44.
[7] Larionov A. Yu., Karanova E. E. Methodology for analyzing the performance of 5G-NR networks during initial planning without deployment using the NS-3 network simulator // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2024. pp. 1141–1145.
[8] Larionov A. Yu., Karanova E. E. Approach for Analyzing the Performance of 5G Networks During the Initial Planning Phase Without Deployment Using the NS-3 Network Simulator // 2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). 2025. pp. 466–471.
[9] Yan Y. et al. A Wireless and Power Grid Converged Network Simulator with Hybrid Energy Sources // 2025 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2025. pp. 1–6.
[10] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; WG2 (RAN 2); Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): RP-222556, RP-221745, RP-230115; Release 17. – Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2019–2023.
[11] Rafique W. et al. A survey on beyond 5g network slicing for smart cities applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2024. vol. 27. no. 1. pp. 595–628.
[12] Sohaib R. M. et al. Intelligent resource management for eMBB and URLLC in 5G and beyond wireless networks // IEEE Access. 2023. vol. 11. pp. 65205–65221.
[13] Kovtun V. et al. The quality of service assessment of eMBB and mMTC traffic in a clustered 5G ecosystem of a smart factory // Egyptian Informatics Journal. 2025. vol. 29. P. 100598.
[14] Haque M. E. et al. A Comprehensive Survey of 5G URLLC and Challenges in the 6G Era // arXiv preprint arXiv:2508.20205. 2025.
[15] Hosseinian M. et al. Review of 5G NTN standards development and technical challenges for satellite integration with the 5G network //IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2021. vol. 36. no. 8. pp. 22–31.

[16] Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of Multipath Transmissions in the Nodes of Switching Segments of Reserved Paths // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2022. pp. 1–5.
[17] Fan L. et al. 4D mmWave radar for autonomous driving perception: A comprehensive survey // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2024. vol. 9. no. 4. pp. 4606–4620.
[18] Batista A.P. et al. A methodology for estimating radiofrequency signal attenuation from rainfall and atmospheric gases in 5G-and-beyond networks // IET Networks. 2025. vol. 14. no. 1. P. e70000.
[19] Kassam J. et al. A review on cell-free massive MIMO systems // Electronics. 2023. vol. 12. no. 4. P. 1001.
[20] Гришенцев А.Ю. Метод пространственного мультиплексирования в многоантенных системах связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. vol. 23. no. 4. pp. 812–819.
[21] Low Z.N. et al. Pulse detection algorithm for line-of-sight (LOS) UWB ranging applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2005. vol. 4. pp. 63–67.

[22] Wang F., Tang H., Chen J. Survey on NLOS identification and error mitigation for UWB indoor positioning // Electronics. 2023. vol. 12. no. 7. pp. 1678.
[23] Вишневский В.М. и др. Оценка характеристик производительности беспроводной сети на базе привязных БПЛА // Проблемы информатики. 2025. no. 1 (66). pp. 60–77.
[24] Гриц В.И. Обзор методов и средств измерения коэффициента усиления и коэффициента эллиптичности антенн космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2023. vol. 7. no. 4. pp. 259–267.
[25] Ehile I.E., Muratov A., Kizilirmak R.C. LTP Performance Evaluation Based on PHY Characteristics for Earth-Moon Satellite Links // 2024 IEEE 10th Information Technology International Seminar (ITIS). 2024. pp. 205–208.
[26] Butt M.M. et al. Ambient IoT: A missing link in 3GPP IoT devices landscape // IEEE Internet of Things magazine. 2024. vol. 7. no. 2. pp. 85–92.
[27] Wang R. et al. Analyzing Localizability of LEO/MEO Hybrid Networks: A Stochastic Geometry Approach // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2025.
[28] Ballard M., Song G., Zhu T. Satellite Cybersecurity Across Orbital Altitudes: Analyzing Ground-Based Threats to LEO, MEO, and GEO // arXiv preprint arXiv:2512.21367. 2025.
[29] Emenonye D.R., Dhillon H.S., Buehrer R.M. Geolocation with Large LEO Constellations: Insights from Fisher Information // arXiv preprint arXiv:2502.06083. 2025.
[30] Farajzadeh A., Yadav A., Yanikomeroglu H. Federated Learning in NTN: Design, Architecture, and Challenges // IEEE Communications Magazine. 2025. vol. 63. no. 6. pp. 26–33.
[31] 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; WG2 (SA2). Study on Integration of Satellite Components in the 5G Architecture; Phase 3: Technical Report 23.700–29; Release 19; SP-231199; SA#101. – Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2023–2024.
[32] 3GPP. Release 17 Description; Summary of Rel-17 Work Items: TR 21.917; Release 17. – Sophia Antipolis, 2022.

EXPLORING THE EXPANSION OF FIFTH-GENERATION NETWORKS USING NON-TERRESTRIAL NETWORKS: A SIMULATION STUDY IN A NETWORK SIMULATOR

A. Yu. Larionov
ITMO University
Saint Petersburg, Russian Federation

The article examines the integration of fifth-generation networks with non-terrestrial networks and analyzes the possibility of using satellite technologies to expand the existing telecommunications infrastructure. Special attention is paid to the use of millimeter waves, which provide high bandwidth and low latency, which makes it possible to create efficient and high-speed communication channels. The paper describes the key characteristics of non-terrestrial networks, as well as their potential to improve the quality of user service in fifth- and future-generation networks. The main focus is on modeling various scenarios of non-terrestrial

networks using the Network Simulator 3 (NS-3), open source simulator, which allows testing new network concepts and protocols without the need for expensive field trials. The results demonstrate that the integration of fifth-generation networks with non-terrestrial networks can significantly expand coverage and improve the reliability and throughput of fifth-generation networks.

Keywords: Non-Terrestrial Network, NTN, satellite communication, millimeter band, network simulation, throughput.

Submitted: 03.04.2026. Accepted: 26.06.2026.

References

[1] 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; WG1 (SA1). Study on using Satellite Access in 5G: Technical Report 22.822; Release 16; SP-170702. – Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2017–2018.

[2] Sun Y. et al. A survey of mmWave backscatter: Applications, platforms, and technologies // ACM Computing Surveys. 2025, vol. 57, no. 9, pp. 1–36.

[3] Mezzavilla M. et al. End-to-end simulation of 5G mmWave networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018, vol. 20, no. 3, pp. 2237–2263.

[4] Vanelli-Coralli A. et al. 5G and beyond 5G non-terrestrial networks: Trends and research challenges // 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF). 2020, pp. 163–169.

[5] Xia X. 5G NTN: Standard Development, Key Technologies and Future Considerations // 2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2024, pp. 236–241.

[6] Lacava A. et al. ns-o-ran: Simulating o-ran 5g systems in NS-3 // Proceedings of the 2023 Workshop on NS-3. 2023, pp. 35–44.

[7] Larionov A. Yu., Karanova E.E. Methodology for analyzing the performance of 5G-NR networks during initial planning without deployment using the NS-3 network simulator // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2024, pp. 1141–1145.

[8] Larionov A. Yu., Karanova E.E. Approach for Analyzing the Performance of 5G Networks During the Initial Planning Phase Without Deployment Using the NS-3 Network Simulator // 2025 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). 2025, pp. 466–471.

[9] Yan Y. et al. A Wireless and Power Grid Converged Network Simulator with Hybrid Energy Sources // 2025 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2025, pp. 1–6.

[10] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; WG2 (RAN 2); Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): RP-222556, RP-221745, RP-230115; Release 17. – Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2019–2023.

[11] Rafique W. et al. A survey on beyond 5g network slicing for smart cities applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 595–628.

[12] Sohaib R. M. et al. Intelligent resource management for eMBB and URLLC in 5G and beyond wireless networks // IEEE Access. 2023, vol. 11, pp. 65205–65221.

[13] Kovtun V. et al. The quality of service assessment of eMBB and mMTC traffic in a clustered 5G ecosystem of a smart factory // Egyptian Informatics Journal. 2025, vol. 29, pp. 100598.

[14] Haque M.E. et al. A Comprehensive Survey of 5G URLLC and Challenges in the 6G Era // arXiv preprint arXiv:2508.20205. 2025.

[15] Hosseinian M. et al. Review of 5G NTN standards development and technical challenges for satellite integration with the 5G network // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2021, vol. 36, no. 8, pp. 22–31.

[16] Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of Multipath Transmissions in the Nodes of Switching Segments of Reserved Paths // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2022, pp. 1–5.

[17] Fan L. et al. 4D mmWave radar for autonomous driving perception: A comprehensive survey // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2024, vol. 9, no. 4, pp. 4606–4620.

[18] Batista A.P. et al. A methodology for estimating radiofrequency signal attenuation from rainfall and atmospheric gases in 5G-and-beyond networks // IET Networks. 2025, vol. 14, no. 1, P. e70000.

[19] Kassam J. et al. A review on cell-free massive MIMO systems // Electronics. 2023, vol. 12, no. 4, P. 1001.

[20] Grishentsev A.Y. Spatial multiplexing method in multi-antenna communication systems // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023, vol. 23, no. 4, pp. 812–819.

[21] Low Z. N. et al. Pulse detection algorithm for line-of-sight (LOS) UWB ranging applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2005, vol. 4, pp. 63–67.
[22] Wang F., Tang H., Chen J. Survey on NLOS identification and error mitigation for UWB indoor positioning // Electronics. 2023, vol. 12, no. 7, P. 1678.
[23] Vishnevsky V. M. et al. Evaluation of the performance characteristics of a wireless network based on tethered UAVS // Problems of computer science. 2025, no. 1 (66), pp. 60–77.
[24] Grits V. I. Review of methods and means of measuring the gain and ellipticity coefficient of spacecraft antennas // Spacecraft and Technologies. 2023, vol. 7, no. 4, pp. 259–267.
[25] Ehile I. E., Muratov A., Kizilirmak R. C. LTP Performance Evaluation Based on PHY Characteristics for Earth-Moon Satellite Links // 2024 IEEE 10th Information Technology International Seminar (ITIS). 2024, pp. 205–208.
[26] Butt M. M. et al. Ambient IoT: A missing link in 3GPP IoT devices landscape // IEEE Internet of Things magazine. 2024, vol. 7, no. 2, pp. 85–92.

[27] Wang R. et al. Analyzing Localizability of LEO/MEO Hybrid Networks: A Stochastic Geometry Approach // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2025.
[28] Ballard M., Song G., Zhu T. Satellite Cybersecurity Across Orbital Altitudes: Analyzing Ground-Based Threats to LEO, MEO, and GEO // arXiv preprint arXiv:2512.21367. 2025.
[29] Emenonye D. R., Dhillon H. S., Buehrer R. M. Geolocation with Large LEO Constellations: Insights from Fisher Information // arXiv preprint arXiv:2502.06083. 2025.
[30] Farajzadeh A., Yadav A., Yanikomeroglu H. Federated Learning in NTN: Design, Architecture, and Challenges // IEEE Communications Magazine. 2025, vol. 63, no. 6, pp. 26–33.
[31] 3GPP. Technical Specification Group Services and System Aspects; WG2 (SA2). Study on Integration of Satellite Components in the 5G Architecture; Phase 3: Technical Report 23.700–29; Release 19; SP-231199; SA#101. – Sophia Antipolis: 3rd Generation Partnership Project, 2023–2024.
[32] 3GPP. Release 17 Description; Summary of Rel-17 Work Items: TR 21.917; Release 17. – Sophia Antipolis, 2022.

Сведения об авторе

Ларионов Александр Юрьевич – аспирант Университета ИТМО. Окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича в 2023 году. Область научных интересов: космическая техника, 5G NR, 5G NTN, разработка и оптимизация сетевых технологий нового поколения.