

Обзор-эссе по статьям, опубликованным по результатам исследований Научно-исследовательского института телекоммуникаций в 2025 г.

Современные исследования в области беспроводных систем 5G/6G все чаще отходят от абстрактных и упрощенных моделей и обращаются к анализу реальных ограничений, с которыми сталкиваются такие системы на практике. Речь идет как о физических эффектах в миллиметровых (mmWave) и субтергерцевых (суб-THz) полосах частот, так и об особенностях аппаратной реализации, сетевой архитектуры и поведения разного типа трафика. По мере роста требований к пропускной способности и задержке становится очевидно, что эффективность будущих сетей определяется не одним уровнем, а их взаимодействием – от радиоканала до алгоритмов управления ресурсами.

В 2025 году научным коллективом Научно-исследовательского института телекоммуникаций НИУ ВШЭ (НИИТ) опубликованы десять научных статей, отнесенных к журналам квартала Q1, в которых исследованы ключевые вопросы развития беспроводных технологий 5G/6G. В настоящем эссе-обзоре эти работы рассматриваются не как набор отдельных результатов, а как взаимосвязанное направление опережающих научных исследований. Цель обзора состоит не только в изложении содержания каждой статьи, но и в анализе их научного вклада, сильных сторон, а также в обсуждении того, каким образом полученные результаты дополняют друг друга и формируют целостное представление о современных направлениях в развитии сетей нового поколения.

Развитие сетей 6G в суб-THz/THz полосе частот открывает возможности для сверхвысоких скоростей передачи данных, но сталкивается с критическими проблемами, связанными с блокировкой прямой видимости (Line of Sight, LoS) и микромобильностью пользовательских устройств (ПУ). Эти проблемы существенно влияют на динамику принимаемого сигнала и, как следствие, на эффективность системы, особенно для приложений с высокой подвижностью, таких как виртуальная реальность и гоночные игры.

В [исследовании](#) [1] предложена методика генерации синтетических временных рядов мощности принимаемого сигнала (Received Signal Strength Power, RSSP), объединяющая эффекты блокировки, микромобильности и алгоритмы отслеживания за лучом. Применяв измерения отдельных процессов блокировки и микромобильности, авторы построили алгоритм для моделирования совместной динамики сигнала, что позволяет оценивать задержки, потери спектральной эффективности и оптимальные интервалы отслеживания за лучом для разных типов приложений. Для проверки корректности модели и оценки ее параметров была проведена серия экспериментов на специально подготовленном измерительном стенде. Измерительная установка состояла из передатчика (Tx) и приемника (Rx), размещенных на расстоянии 4 м друг от друга на одной высоте. Схема измерительного стенда показана на рисунке 1.

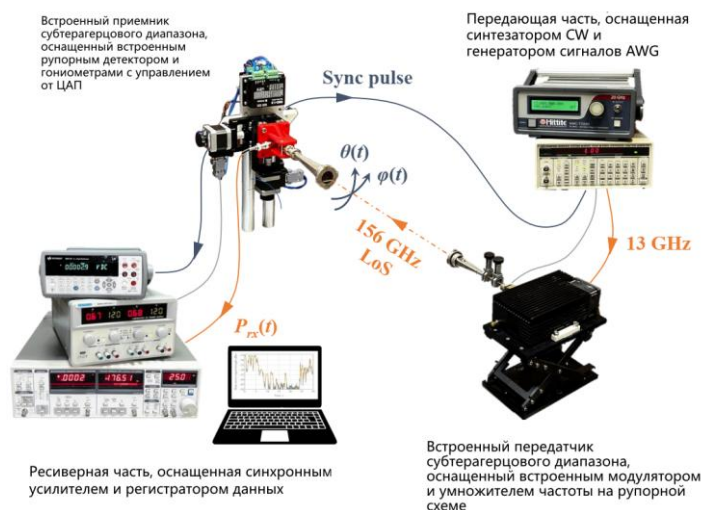


Рисунок 1 – Схема измерительного стенда

T_x формировал модулированный непрерывный сигнал (Continuous Wave, CW) с выходной мощностью 44 мВт, управляемый произвольным генератором сигналов (Arbitrary Waveform Generator, AWG). R_x оснащался диодным детектором с чувствительностью 100 В/Вт и эквивалентной шумовой мощностью около 1 нВт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Для динамического изменения ориентации антенны R_x по осям крена и тангажа использовался 2D-гониометр, управляемый системой сбора данных (Data Acquisition System, DAQ), которая также синхронизировала движение гониометра с генерацией и обработкой суб-THz сигнала. Номинальная скорость сканирования гониометра составляла 6,67 °/с по каждой оси. Параметры системы гониометра были откалиброваны с использованием данных эмуляции центра луча.

По результатам исследований сформулирован вывод, что для динамичных приложений минимальный интервал отслеживания за лучом должен составлять 80 мс, тогда как для пользователей с низкой скоростью движения достаточно 320–1000 мс. При этом различия между нерегулярным и регулярным отслеживанием за лучом заметны только для приложений с высокой подвижностью, приводя к снижению спектральной эффективности на 4–6,5 бит/Гц/с. Для остальных сценариев оптимизация процедур отслеживания за лучом позволяет снизить накладные расходы до 20–30 раз. Предложенная исследователями НИИТ библиотека синтетических временных рядов открыта для научного сообщества и может использоваться для разработки физических и системных механизмов 6G, а также для проверки сложных моделей каналов связи. В целом, исследование показывает, что для эффективной работы 6G суб-THz/THz систем необходимо учитывать, как динамику пользователя, так и случайный характер блокировок, а разработка соответствующих алгоритмов отслеживания за лучом становится ключевым инструментом для обеспечения высокой надежности и пропускной способности сети.

В современных сетях 5G/6G эффективность системы пользователей зависит не только от характеристик радиоканала и среды распространения, но и от параметров входящего трафика. Большинство известных исследований традиционно моделируют сессии как независимые события, наступающими в соответствии с некоторым пуассоновским процессом, однако реальный трафик часто характеризуется временной корреляцией и неравномерным трафиком, что может существенно ухудшать показатели качества обслуживания и использования ресурсов. Поэтому в [работе](#) [2] предложена новая математическая модель обслуживания сессий на базовой станции (БС) с учетом корреляции и изменчивости потока поступления сессий. Используя методы стохастической геометрии и теории массового обслуживания, авторы учитывают специфику mmWave/суб-THz каналов, включая блокировки и направленные антенны, и оценивают ключевые показатели, такие как вероятность потери сессии и коэффициент использования ресурсов системы. Результаты исследования показывают, что даже небольшое отклонение от пуассоновского процесса, выражающееся в лаг-1 нормализованной автокорреляционной функции (Normalized AutoCorrelation Function, NACF) и коэффициенте вариации (Coefficient of Variation, CoV), может привести к двукратному увеличению вероятности потери сессии и снижению коэффициента использования ресурсов на 10–30%. Для высоких значений NACF и CoV ухудшение показателей может достигать порядка величины, что показывает, насколько критично учитывать реальные характеристики трафика при оценке производительности сети. Также выявлено, что параметры радиоканала и среды усиливают вариативность требований к ресурсам, дополнительно влияя на эффективность системы. Главный вывод исследования заключается в том, что традиционное предположение о пуассоновском трафике может сильно зависеть возможности сети, а для точной оценки производительности mmWave/суб-THz систем необходимо учитывать, как статистику канала, так и коррелированные и изменчивые свойства трафика. Модель, предложенная

учеными НИИТ, открывает возможности для дальнейших исследований, включая мультисвязность и динамическую мобильность пользователей, обеспечивая более реалистичную оценку качества обслуживания в 5G/6G сетях.

Стоит отметить, что сети 5G/6G разрабатываются для поддержки приложений с высокой и постоянной скоростью передачи данных, таких как VR, HD-видео и услуги телеприсутствия. Однако процесс обслуживания таких сессий отличается встроенной несправедливостью: пользователи, находящиеся ближе к БС, получают приоритет, поскольку их ресурсоемкость ниже средней, что сокращает эффективную зону покрытия станции. Дополнительно, низкая адаптивность приложений приводит к низкой эффективности использования ресурсов.

В другом [исследовании](#) [3] предложен простой, но эффективный метод – виртуальное буферизованное ожидание сессий. Метод заключается в разработке виртуальной очереди для входящих сессий, что позволяет управлять порядком их обслуживания и добиваться равномерного распределения ресурсов. Рассматривались три стратегии выбора сессий: первым пришел – первым обслужен (First Come, First Served, FCFS), приоритет «тяжелых» сессий, приоритет «легких» сессий. Анализ с использованием стохастической геометрии и теории очередей показал, что даже одна виртуальная позиция в буфере обеспечивает практически полную справедливость, при этом каждая дополнительная позиция увеличивает эффективность использования ресурсов на 2–3%.

Основным ограничением метода является небольшая задержка при начале обслуживания, которая для 1–3 виртуальных позиций составляет 1–3 секунды и практически незаметна для пользователей. Метод особенно полезен при высокой нагрузке, когда традиционная несправедливость наиболее выражена, а в условиях нормальной загрузки задержки не возникают. Выбор стратегии FCFS позволяет одновременно улучшить справедливость и эффективность, минимизируя вероятность ожидания, в то время как приоритет «тяжелых» сессий слегка ухудшает показатели.

Главный вывод [исследования](#) [3] заключается в том, что виртуальное буферизованное обслуживание является эффективным инструментом для повышения справедливости и использования ресурсов в перегруженных mmWave/суб-THz сетях, при этом оператор сети может регулировать размер виртуального буфера в зависимости от приоритетов – максимизация справедливости, увеличение числа обслуживаемых сессий или минимизация задержки.

Наряду с управлением очередями и ресурсами, критически важным условием высокой пропускной способности является точность и скорость отслеживания луча. Традиционные методы машинного обучения сталкиваются с проблемами масштабирования и приватности данных, что приводит к необходимости поиска новых подходов: централизованное обучение (Centralized Learning, CL) обеспечивает быструю сходимость, но требует больших вычислительных ресурсов и нарушает приватность данных, а федеративное обучение (Federated Learning, FL) решает эти проблемы, но характеризуется медленной сходимостью и низкой точности из-за неоднородности данных пользователей.

В [исследовании](#) [4] предложен новый подход в методах применения искусственного интеллекта (ИИ) в сетях 5G/6G – кластеризованное федеративное обучение (Clustered Federated Learning, CFL). Идея CFL заключается в группировке пользователей с похожими распределениями данных в кластеры и обучении одной модели для каждого кластера. Это позволяет уменьшить накладные расходы по обмену данных, ускорить обучение и повысить точность модели. В статье проведен анализ ключевых атрибутов, влияющих на кластеризацию, и показано, как они сказываются на эффективности обучения. Результаты исследования показывают, что CFL превосходит традиционные методы CL и FL, обеспечивая улучшение точности на 18% по сравнению с FL и на 11% по сравнению с CL. Такой подход снижает время обучения и повышает скорость сходимости алгоритмов отслеживания за лучом, что критично для динамичных mmWave/суб-THz диапазонов длин

волн. При этом приватность данных пользователей сохраняется, так как обучение остается распределенным внутри кластеров.

Главный результат [работы](#) [4] заключается в том, что кластеризация пользователей по схожести данных позволяет существенно повысить эффективность и точность алгоритмов отслеживания за лучом, снижая затраты по обмену данными и ускоряя обучение. Метод CFL является эффективным для применения в динамичных сценариях будущих сетей, таких как V2X-технологии и сети с поддержкой беспилотных летательных аппаратов, а также открывает возможности для гибридных схем обучения, объединяющих локальную персонализацию с межкластерным обменом знаниями.

Эффективные алгоритмы управления сигналом требуют соответствующей аппаратной поддержки. Одним из актуальных решений являются реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS), которые представляют собой эффективную технологию для увеличения пропускной способности и зоны покрытия сотовых сетей за счет адаптивного изменения фазы отраженных сигналов. Традиционный подход, ориентированный на БС, требует интеграции RIS в инфраструктуру оператора, что затрудняет развертывание в существующих сетях. В отличие от этого, в [статье](#) [5] предложена концепция User-Centric RIS, при которой управление RIS осуществляется пользовательским устройством ПУ, позволяя абонентам самостоятельно устанавливать RIS в офисах и жилых помещениях без участия оператора. Для реализации данной концепции авторы разработали обратную связь MS (Mobile-Station)-RIS, передающую измерения мощности принятого опорного сигнала (Reference Signal Received Power, RSRP) от ПУ к RIS, а также алгоритм настройки фаз на основе сканирования луча, учитывающий канал между БС и ПУ. Экспериментальная проверка на базе прототипа RIS в существующей LTE-сети с использованием ПУ и программно-определяемого радио (Software-Defined Radio, SDR) показала значительное улучшение производительности: увеличение RSRP до 10 дБ и удвоение скорости по нисходящей и восходящей линиям связи в сценариях вне помещения и в комнате. Время перенастройки RIS составило не более 6 секунд, что значительно быстрее существующих подходов.

Главный вывод [исследования](#) [5] заключается в том, что модель User-Centric RIS позволяет повысить качество связи для ПУ на краю зоны покрытия и в местах со слабым сигналом, при этом не требуя изменений в инфраструктуре оператора. Этот подход открывает возможность для гибкого и недорогого улучшения существующих сетей 5G, а также показывает возможность для дальнейшего расширения управления RIS несколькими ПУ. В целом, работа показывает, что распределенное управление RIS с обратной связью от ПУ является эффективным и практически применимым способом повышения производительности современных и будущих сетей 5G/6G.

Одной из ключевых особенностей будущих 6G систем, работающих в суб-THz/THz диапазонах (0,1–3 ТГц), является то, что часть зоны покрытия БС находится в ближнем поле. В этой зоне мощность принятого сигнала (Signal Received Power, SRP) зависит не только от расстояния до ПУ, но и от его точных координат, что требует более сложных методов управления волновым фронтом, чем классическое формирование луча. Для корректного переключения между режимами работы антенны необходимы надежные алгоритмы, способные определять положение ПУ относительно БС.

Особенно актуально управление сигналом в сетях 6G, работающих в суб-THz диапазоне, где часть зоны покрытия находится в ближнем поле, а точное определение положения ПУ критично для адаптивного формирования волнового фронта. В [статье](#) [6] предложен простой и эффективный алгоритм определения состояния пользователя, использующий только SRP без сложного сбора дополнительных данных на этапе обучения. Для оценки эффективности метода проведены эксперименты с ПУ, движущимся по фиксированной направляющей линии, либо свободно удерживалось в руке пользователя. Результаты эксперимента показали, что алгоритм на основе сети долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM) обеспечивает наилучшую точность: выше 90%

для сценария ПУ в руке и почти 100% для ПУ на направляющей. Простые древообразные алгоритмы обеспечивают точность 95–97% для ПУ на направляющей и 80–85% для ПУ в руке. Детекция состояния выполняется достаточно быстро – за 200–400 мс, что позволяет реализовать алгоритм в реальном времени.

Главный вывод исследования заключается в том, что использование LSTM для анализа SRP позволяет точно определять переход ПУ между ближним и дальним полями, что критично для применения различных методов волнового фронта в сетях 6G. Простой и быстрый алгоритм определения позволяет применять его в реальном времени без необходимости сложного дополнительного оборудования или внешней информации о положении ПУ. В работе продемонстрирована практическая применимость машинного обучения для адаптивного управления антеннами в сверхвысокочастотных сетях будущего.

Кроме алгоритмов управления сигналом, важным этапом развития 6G систем являются аппаратные решения для обработки сигнала THz-диапазона. В [работе](#) [7] исследуется применение халькогенидного материала Ge–Sb–Te (GST) с фазовой памятью для расширения возможностей, интегрированных THz фотонных схем. Исследование показало, что коэффициент поглощения между аморфным и кристаллическим состоянием GST на кремниевом волноводе превышает 10 дБ в диапазоне 126,5–145,5 ГГц. Основной механизм затухания связан с поглощением THz-излучения свободными носителями заряда, концентрация которых сильно зависит от фазового состояния материала. Для приложений, требующих выбора по частоте или маршрутизации сигнала, был создан дисковый резонатор, для которого измеренный свободный спектральный диапазон составил 3,7 ГГц, а коэффициент точности резонанса достиг 975. Авторы разработали и экспериментально охарактеризовали суб-ТГц интегральный аттенюатор в двух различных конфигурациях. Первый тип элементов основан на прямых волноводных структурах, а второй – на дисковом резонаторе (рис. 2). Каждый тип образцов был покрыт пленкой материала с фазовой памятью GST с параметрами, приведенными в предыдущих разделах настоящего отчета. Также были изготовлены образцы волноводных структур без пленки GST для сравнительного изучения. Такие параметры открывают возможность использования GST в модуляции сигнала, полностью оптической маршрутизации, нейроморфных схемах и матрично-векторных вычислениях.

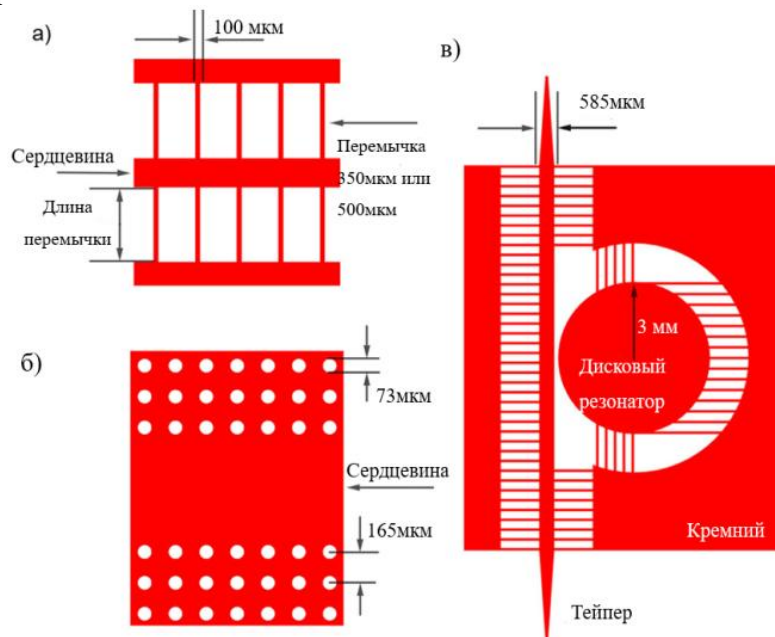


Рисунок 2 – Схемы исследованных кремниевых интегральных структур: а) ленточный диэлектрический волновод, б) диэлектрический волновод с эффективной средой, в) диэлектрический дисковый резонатор

В [исследовании](#) [7] также описаны проведенные учеными НИИТ эксперименты с аморфными и кристаллическими тонкими пленками GST, кристаллизация которых проводилась при 200 °C под потоком аргона. Источником THz-излучения служил осциллятор обратной волны, а прием – диод Шоттки и колориметрический детектор. Эксперимент позволил изучить разницу коэффициентов поглощения для двух поляризаций THz-излучения и подтвердил эффективность GST для регулирования сигналов. Таким образом, использование фазового материала GST в терагерцовых интегрированных схемах показывает высокую эффективность и открывает широкие возможности для будущих приложений в сети 6G, нейроморфных вычислениях и хранении данных, позволяя создавать динамически перенастраиваемые и функционально гибкие устройства.

Эти аппаратные усовершенствования тесно связаны с развитием технологий RIS. В [работе](#) [8] представлена разработка технологически надежной четвертьволновой ячейки, использующей закрепленную логарифмическую спираль (Logarithmic Spiral, LPS), предназначенной для включения в монолитную RIS, работающую на частоте 140 ГГц. Дизайн обеспечивает широкий угол управления лучом с обзором поля в 150° и ультрабыстрый контроль благодаря встроенным варикап-диодам. Диапазон фазового управления достигает 340° для *s*-поляризованных сигналов при настройке емкости диодов от 3,5 до 19,2 фФ, обеспечивая возможности неоспекулярных отражений с умеренными потерями. При этом фазовые сдвиги для *p*-поляризованных сигналов не изменяются, что делает конструкцию удобной для RIS-панелей с управляемым секторным лучом.

Проведенный эксперимент показал технологическую реализуемость RIS на кварцевой подложке с диодами GaAs. Прототипирование в масштабе 14:1 выявило время фазового переключения 1 мкс и стабильность фазы 0,1° в режиме наибольшего наклона отклика диода. Разработанная панель с 72×72 ячейками, загруженными микрокапациторами, показала ширину основного лепестка 4° и уровень боковых лепестков –11 дБ при 140 ГГц, а пиковые потери отражения составили 9,3 дБ. Все результаты хорошо согласуются с моделированием в диапазоне 130–180 ГГц. Предложенный подход открывает возможности для сетей 6G, включая снижение блокировок и поддержку микромобильности ПУ. Высокая скорость фазового управления и управления лучом делают эту RIS-панель эффективным инструментом для будущих систем беспроводной связи в субтерагерцовом диапазоне.

Наряду с аппаратными решениями, значительное влияние на эффективность сети оказывают архитектурные особенности. Технология IAB (Integrated Access and Backhaul) стандарта 3GPP предназначена для эффективного увеличения плотности сетей 5G/6G. Одним из ключевых показателей таких систем является задержка передачи пакетов, которая сильно зависит от числа промежуточных IAB-узлов и условий дорожного трафика. В [исследовании](#) [9] рассматривается развертывание IAB вдоль дорог и автомагистралей с учетом ограничений полудуплексной связи, характеристик распространения mmWave и динамики буферизации в узлах сети. Для улучшения покрытия предполагается, что последовательные IAB-узлы размещаются по обе стороны дороги, как показано на рисунке 3. Расстояние между узлами определяется на основе выбранной модели распространения так, чтобы не было «белых зон» в покрытии. Высоты донорского узла и промежуточных узлов принимаются одинаковыми, а ПУ в нашем случае представлены пассажирами в транспортных средствах.

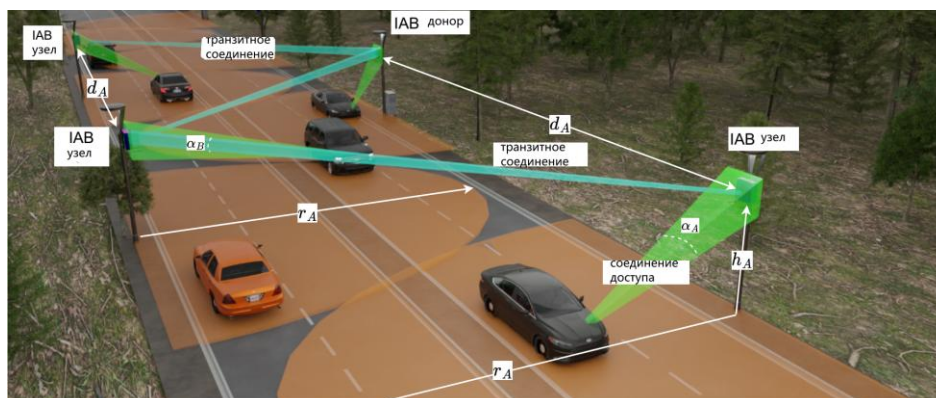


Рисунок 3 – Схема развертывания последовательных IAB-узлов вдоль дороги

Авторы применили теорию массового обслуживания для моделирования задержек и методы стохастической геометрии для параметризации радиоэлементов системы. Модель учитывает плотные потоки данных от пользователей и особенности планирования ресурсов сетей 5G/6G. Основными метриками оценки стали задержка передачи пакетов и коэффициент использования ресурсов. Полученные результаты показывают, что в дорожных IAB-сетях основным узким местом является магистральный (backhaul) канал, а число IAB-узлов, поддерживаемых одним донором, ограничено условиями трафика, даже при большой пропускной способности сети. Средняя задержка растет экспоненциально с числом узлов в системе, что означает частичное накопление перегрузки на последних узлах. Эффективным инструментом оптимизации является выбор минимальной схемы модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme, MCS) на магистральных каналах и корректировка расстояния между IAB-узлами. Это позволяет адаптировать сеть под плотность дорожного движения и минимизировать задержки.

Наконец, эффективность сетей 5G/6G напрямую зависит от оптимального распределения ресурсов на каналах управления и передачи данных. Развитие таких сетей предъявляет высокие требования к скорости передачи данных, особенно для приложений с высокой пропускной способностью. Одной из ключевых проблем современных БС является ограниченность ресурсов PDCCH (Physical Downlink Control Channel), отвечающего за управление, и PDSCH (Physical Downlink Shared Channel), передающего данные ПУ. При увеличении числа пользователей эффективность распределения ресурсов становится критическим сигналом для качества обслуживания. Поэтому в заключительном [исследовании](#) [10] разработана модель, совместно описывающую использование ресурсов PDCCH и PDSCH при разных требованиях к трафику. Авторы разработали математическую модель, объединяющую инструменты стохастической геометрии и теории массового обслуживания для анализа динамики обслуживания сессий пользователей. Особое внимание уделено стратегиям распределения PRB (Physical Resource Block): последовательному и непоследовательному. Результаты показали, что непоследовательное планирование требует значительно меньше PRB и позволяет более эффективно использовать ресурсы, тогда как при последовательном планировании наблюдается длинный хвост распределения, ограничивающий эффективность PDCCH и создающий переполнения PDSCH.

Модель позволяет заранее определять оптимальное распределение ресурсов в зависимости от системной полосы и требований к трафику. Основной вывод заключается в том, что для типичных условий 5G NR предпочтительно непоследовательное планирование PRB, а размер PDCCH является ключевым узким местом. При этом динамическая адаптация PDCCH может еще больше повысить эффективность системы. Исследование показывает, что эффективное распределение ресурсов критически важно для обеспечения высокой пропускной способности и надежности сетей 5G/6G.

На основе анализа представленных исследований следует сформулировать несколько важных выводов. Во-первых, сети следующего поколения 5G/6G являются сложными

системами, в которых необходимо учитывать не только характеристики радиоканала, но и поведение пользователей, изменения трафика и особенности оборудования. Во-вторых, применение интеллектуальных алгоритмов, включая методы машинного и федеративного обучения, позволяет более эффективно управлять ресурсами сети и обеспечивать более справедливое обслуживание пользователей. В-третьих, новые аппаратные решения открывают возможности для создания гибких и перенастраиваемых систем связи с высокой пропускной способностью. Наконец, выбранная сетевая архитектура и способы планирования ресурсов напрямую влияют на скорость передачи данных, задержки и способность сети работать в условиях большого числа пользователей.

Таким образом, современные исследования показывают, что успешное развитие сетей 5G/6G возможно только при комплексном подходе, который объединяет эксперименты, моделирование, интеллектуальные алгоритмы и аппаратные инновации. Такой подход позволяет лучше понять принципы работы будущих систем связи и создать надежные и эффективные беспроводные сети нового поколения.

Список статей

1. Beschastnyi, V., Ershova, M., Ostrikova, D., Prosvirov, V., Shurakov, A., Gaidamaka, Y., Gol'tsman, G. 2025. [Generating Measurement-Based Synthetic Received Signal Power Data for 6G Sub-Terahertz Research With Micromobility and Blockage](#) // *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 174797-174814.
2. E. Sopin, V. Begishev, V. Prosvirov, K. Samuyilov and Y. Koucheryavy. 2025. [The Impact of Traffic Characteristics on System and User Performance in 5G/6G Cellular Systems](#) // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 74, No. 12, pp. 19483-19495.
3. Sopin, E., Daraseliya, A., Begishev, V., Samouylov, K., Koucheryavy, Y. 2025. [Improving fairness and utilization in 5G/6G mmWave/sub-THz systems via virtual queuing](#) // *Computer Networks*, Vol. 265, article 111317.
4. A. Ali and Y. Koucheryavy. 2025. [Adaptive Beam Tracking in 5G/6G mmWave Networks: A Clustered Federated Learning Approach](#) // *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 70705-70720.
5. Poyda, A., Tyarin, A., Glinskiy, K., Burtakov, I., Kureev, A., Khorov, E. 2025. [Experimental study of a User-Centric RIS in existing cellular systems](#) // *Computer Networks*, Vol. 263, article 111219.
6. Prosvirov, V., Ershova, M., Shurakov, A., Koucheryavy, Y., Gol'Tsman, G. 2025. [Near/Far-Field State Detection for 6G Terahertz Communications Systems](#) // *IEEE Communications Letters*, Vol. 29, Issue 7, pp. 1584-1588.
7. Seliverstov, S., Svyatodukh, S., Kozhukhovskiy, A., Fudin, D., Lazarenko, P., Terekhov, D., Goltsman, G. 2025. [Hybrid terahertz photonic integrated circuits based on Ge2Sb2Te5 phase change material atop of silicon waveguides](#) // *Optical Materials*, Vol. 167, article 117216.
8. Shurakov, A., Rozhkova, P., Belikov, I., Lvov, A., Nurmatov, N., Prihodko, A., Goltsman, G. 2026. [Quarter-Wave Unit Cell with Grounded Log-Periodic Spiral for a sub-THz Reconfigurable Intelligent Surface with Sector Beam](#) // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 25, Issue 2, pp. 706-710.
9. Morozova, U., Machnev, E., Beschastnyi, V., Ostrikova, D., Gaidamaka, Y., Koucheryavy, Y., Samouylov, K. 2025. [Delay and Utilization Analysis of Roadside 5G NR IAB](#)

[Deployments with Half-Duplex Constraints](#) // *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 6, 10665-10680.

10. Sopin, E., Nazarin, A., Begishev, V., Koucheryavy, Y., Samuyilov, K. 2025. [Characterizing the Scheduling Performance of 5G NR Base Stations Under Signaling and Data Traffic Constraints](#) // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, doi: 10.1109/TVT.2025.3649388.