

УДК 621.396.218+004.8

6G: ПЕРВЫЕ КОНЦЕПЦИИ — THz-ДИАПАЗОНЫ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В РАДИОКАНАЛЕ

Я.Ю. СЕРЖАНТОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)*

E-mail: wolkqwertyu@mail.ru

Аннотация. Пятое поколение сотовой связи (5G) уже активно внедряется, открывая возможности для массового интернета вещей (IoT) и автономных систем. Однако ряд приложений будущего, таких как голографическая связь, тактильный интернет и иммерсивная дополненная реальность, потребуют скорости передачи данных в несколько терабит в секунду (до 1 Тбит/с) при микросекундных задержках (0,1–1 мс) с плотностью подключения до 10^3 устройств на км². Согласно видению Международного союза электросвязи (ITU-R), 6G, официально именуемая IMT-2030 («International Mobile Telecommunications for 2030 and beyond»), станет ответом на эти вызовы.

Abstract. Fifth-generation cellular communications (5G) are already being actively deployed, opening up opportunities for the mass internet of things (IoT) and autonomous systems. However, a number of future applications, such as holographic communications, the tactile internet, and immersive augmented reality, will require data rates of several terabits per second (up to 1 Tbps) with microsecond latencies (0.1–1 ms) and a connection density of up to 10^3 devices per km². According to the vision of the International Telecommunication Union (ITU-R), 6G, officially known as IMT-2030 ("International Mobile Telecommunications for 2030 and Beyond"), will be the answer to these challenges.

Введение

Переход к 6G — это не просто эволюционное улучшение, а смена парадигмы. В отличие от 5G, где связь была «скоростной», 6G будет «интеллектуальной». Для этого в основу концепции заложены три ключевых столпа. Терагерцовый (THz) диапазон — источник колоссальной пропускной способности, реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS) — инструмент формирования радиосреды и нативный искусственный интеллект (Native-AI) — «мозг» сети.

Преимущества THz-диапазона

Несмотря на техническую сложность реализации, использование THz-частот открывает перед будущими коммуникационными системами ряд уникальных возможностей:

Непревзойденная пропускная способность: Главное преимущество THz-диапазона — наличие доступной непрерывной полосы пропускания, измеряемой десятками и сотнями гигагерц. Это в сотни раз превышает ресурсы, доступные для сетей 5G, и позволяет достигать пиковых скоростей передачи данных на уровне 100 Гбит/с и выше — характеристики, недостижимой для традиционных частот. Современные экспериментальные демонстрации уже показывают скорости до 240 Гбит/с и выше.

Ультранизкая задержка и высокая надежность: Использование широких полос позволяет передавать информацию сверхкороткими импульсами, что сокращает время распространения сигнала и пакетной обработки данных. Это критически важно для удаленных хирургических вмешательств, управления беспилотными системами в реальном времени и тактильного интернета, где допустимые задержки составляют доли миллисекунды.

Одновременная связь и зондирование: Короткая длина волны THz-излучения (менее 1 мм) позволяет создавать компактные, но при этом высокоточные антенные решетки. Это открывает возможность реализации концепции Интегрированных Измерений и Связи — когда один и тот же сигнал используется не только для передачи данных, но и для высокоточного радиолокационного зондирования окружающего пространства с миллиметровым разрешением, построения 3D-моделей и бесконтактной биомедицинской диагностики. Именно эта синергия кардинально расширяет функциональность будущих сетей 6G.

Повышенная безопасность и скрытность: Благодаря высокой направленности и стремительному затуханию в атмосфере (ослабление до 20 дБ/км на некоторых частотах), THz-связь обладает повышенной

устойчивостью к перехвату. Сигнал практически не проникает за пределы прямой видимости, что усложняет его несанкционированное обнаружение и подслушивание.

Безопасность для живых организмов: Энергия фотона в THz-диапазоне в тысячи раз меньше энергии рентгеновского излучения и не способна вызывать ионизацию атомов. Это делает THz-волны абсолютно безопасными для людей и живых клеток, что открывает широкие перспективы для их использования в медицинской диагностике и сканировании.

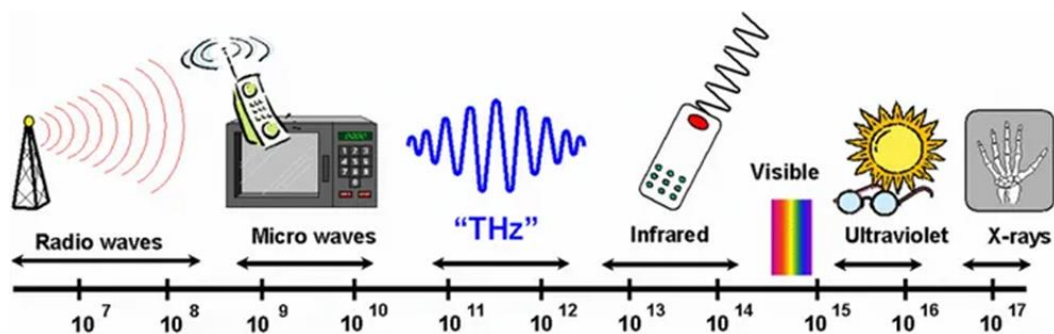


Рис. 1. Диапазон частот

Физические основы и проблемы распространения сигнала

Именно физические ограничения распространения THz-волн являются основной причиной, по которой внедрение этой технологии сопряжено с такими сложностями:

Колоссальные потери в свободном пространстве: Согласно формуле Фрииса, потери при распространении радиоволн пропорциональны квадрату частоты. При увеличении несущей с 3 ГГц (типичный диапазон 4G) до 300 ГГц (нижняя граница THz-диапазона) потери в вакууме возрастают в 10 000 раз (на 40 дБ). Это ключевое ограничение, которое невозможно преодолеть простым повышением мощности передатчика.

Молекулярное поглощение и эффект "окон прозрачности": В отличие от вакуума, земная атмосфера содержит пары воды и молекулы кислорода, которые интенсивно поглощают THz-излучение на определенных резонансных частотах. Наиболее сильное поглощение наблюдается вблизи частот 0,18 ТГц, 0,57 ТГц и 0,75 ТГц, где потери могут достигать десятков децибел на километр. Оставшиеся прозрачные "окна" условно пригодны для связи, но даже в них максимальная дальность передачи редко превышает 100–200 метров.

Крайняя чувствительность к препятствиям и направленности: THz-излучение практически не огибает препятствия из-за крайне малой длины волны. Любое физическое тело (человек, стена, дерево) полностью блокирует сигнал. Это означает, что для устойчивой связи требуется строгая прямая видимость между передатчиком и приемником.

Следствием высокой направленности является жесткое требование к точности наведения узких лучей. Отклонение антенны или угла поворота абонентского устройства на доли градуса приводит к практически полному пропаданию соединения (потери до 50 дБ при погрешности менее 1°). Для поддержания связи в динамической среде (движение человека или автотранспорта) необходимы молниеносные алгоритмы отслеживания, предсказания положения абонента и переконфигурации антенной решетки.

Аппаратные ограничения: от физики до инженерии

Если даже проблемы распространения сигнала теоретически могут быть компенсированы высокой направленностью и малой дальностью связи, то следующее препятствие носит фундаментальный характер — неготовность существующей электронной компонентной базы:

Проблема генерации достаточной мощности: Традиционные кремниевые CMOS-транзисторы на частотах выше 100 ГГц практически перестают работать как усилители мощности из-за паразитных емкостей и эффектов конечного времени пролета носителей. Компаундные полупроводники (арсенид галлия, нитрид галлия) на частотах THz имеют выходную мощность в единицы-десятки милливатт, что на 2–3 порядка ниже, чем на частотах 5G. Этой мощности хватает лишь на несколько десятков метров связи даже при самых совершенных антеннах.

Собственные шумы и нелинейности (Hardware Impairments): Фазовый шум генераторов на THz частотах настолько высок, что делает невозможным использование высокоуровневых типов модуляции (например, 64QAM и выше). Мощные усилители вносят сильные нелинейные искажения, а аналого-цифровые

преобразователи (АЦП) с GHz-полосой характеризуются высоким уровнем квантования. Совокупность этих искажений создает "потолок пропускной способности", который невозможно преодолеть простым увеличением мощности или ширины спектра.

Проблема интеграции и тепловыделения: Ультравысокая частота требует микронной точности изготовления фидерных линий и антенн. Нарушение топологии связей ведет к рассогласованию и отражению мощности. Кроме того, при столь высоких частотах резко возрастают потери в диэлектриках печатных плат и проводниках. Для решения этой проблемы требуются дорогостоящие керамические подложки и методы 3D-гетерогенной интеграции (InP/GaAs + CMOS).

Современные исследования и пути преодоления барьеров

Активные исследования (2025–2026 гг.) ведутся по нескольким направлениям, демонстрируя значительный прогресс в области материаловедения, системной архитектуры и алгоритмического обеспечения.

Метаматериалы и фотонные методы: Группа ученых из Сингапура, Франции и США создала компактную кремниевую THz-антенну на основе топологической фоники. Эта пассивная антенна обеспечивает угол обзора, покрывающий 75% окружающего пространства, что в десятки раз превышает показатели обычных THz-аналогов. При этом устройство полностью пассивно и не требует сложных систем механического наведения.

Инновационные полупроводниковые решения: В журнале Nature Communications (2026) представлен разработки суб-терагерцовых приемников на основе графена. Эти устройства отличаются рекордной компактностью и энергоэффективностью, предлагая прямой метод детектирования без громоздких гетеродинных схем, что может обеспечить скорость передачи данных в несколько гигабит в секунду в микросхемных и чип-чиповых соединениях.

Применение технологий искусственного интеллекта: Исследования 2025–2026 гг. все чаще обращаются к использованию глубокого обучения для борьбы с ранее упомянутыми проблемами. ИИ применяется для: высокоточного моделирования затуханий в сложной атмосфере, прогнозирования положения абонента в реальном времени для удержания луча ("beam management и tracking") и быстрой компенсации искажений, вносимых неидеальными аналоговыми трактами. Этот подход, известный как принцип «ИИ-нативного управления THz», рассматривается как безальтернативный для реализации промышленных стандартов 6G после 2030 года.

Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS) — инструмент формирования радиосреды.

В течение десятилетий развитие беспроводных технологий от первого до пятого поколения базировалось на одном и том же принципе: среда распространения радиоволн воспринималась как неизменная и неуправляемая сущность, которую необходимо лишь компенсировать сложными схемами на передающей и приемной сторонах. Однако стремительный рост трафика данных и появление требований к ультранизким задержкам для тактильного интернета, дополненной реальности и удаленной хирургии сделали очевидным, что улучшения только на концах канала уже недостаточно.

В ответ на этот вызов на рубеже 2020-х годов сформировалась принципиально иная концепция. Она предлагает не адаптироваться к хаотичной радиосреде, а активно формировать ее, превращая пассивные препятствия (стены, потолки, фасады зданий) в элементы интеллектуальной сети. Ключевым инструментом реализации этой концепции стали реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS) — технология, которая с позиций 2025–2026 годов рассматривается как один из краеугольных камней для сетей шестого поколения (6G).

Определение и анатомия RIS реконфигурируемая интеллектуальная поверхность — это двумерная программируемая структура, состоящая из тысяч или миллионов микроскопических элементов, размер которых меньше длины волны рабочего сигнала. Ее часто называют «интеллектуальным зеркалом» или «умной стеной». Она способна динамически изменять свои электромагнитные свойства, чтобы управлять падающими на нее радиоволнами.

В основе RIS лежат две ключевые области знаний: метаповерхности (Metasurfaces) — фундаментальные строительные блоки RIS. Это тонкие двумерные массивы из специально спроектированных структурных элементов — метаатомов. Их геометрия и материал определяют способность взаимодействовать с электромагнитным полем на субволновом уровне.

Программируемое управление — мозг RIS. Сложные алгоритмы, часто на основе методов искусственного интеллекта, в реальном времени анализируют состояние радиоканала и рассылают команды тысячам метаатомов для изменения фазы, амплитуды или поляризации отраженного, преломленного или проходящего сквозь поверхность сигнала.

Принцип работы: от случайного отражения к программируемому волновому фронту

Работа RIS основана на манипулировании волновым фронтом. Классическая стена или потолок в офисе отражают радиосигнал хаотично, создавая помехи и "мертвые зоны". RIS же, зная расположение передатчика и приемника, задает каждому из своих отражающих элементов индивидуальный фазовый сдвиг. В результате возникает точно сформированное наведенное отражение: среда не просто пропускает сигнал, а активно направляет его по оптимальному пути, "заворачивая" за угол здания или фокусируя в зоне плохого приема. Благодаря пассивной природе большинства RIS они вносят минимальные искажения и шумы.

RIS: занимает промежуточное, но уникальное положение. Элементы RIS управляют отражением, но в массе своей не имеют активных радиочастотных усилителей. Энергопотребление RIS, как показали реальные прототипы 2025 года, составляет порядка 100 мВт — это в тысячи раз меньше, чем у аналогичной по размеру активной антенной решетке. При этом современные образцы RIS с двойной поляризацией на 2 бита уже демонстрируют эффективную работу в диапазоне 3,6 ГГц с возможностью отклонения луча до $\pm 60^\circ$. Таким образом, RIS обеспечивает низкую стоимость и низкое энергопотребление при интеллектуальном управлении.

Ключевые возможности и особенности применения RIS

Технология RIS не просто улучшает связь — она привносит в сеть новые функциональные возможности:

Преодоление "теней" и слепых зон: На высоких частотах (mmWave, THz) сигнал легко блокируется стенами или даже человеком. Разместив RIS на фасаде здания или внутри помещения, можно "обогнуть" препятствие и доставить сигнал туда, где прямая видимость отсутствует. В пятой главе будет показано, насколько это критично для THz-диапазона.

Виртуальное MIMO: RIS может динамически создавать "виртуальный луч" высокой направленности даже к одному пользователю, многократно увеличивая качество сигнала и пропускную способность.

Безопасность на физическом уровне: Управляя отражением, RIS способна "гасить" сигнал в направлениях потенциальных злоумышленников, создавая защищенные зоны связи и подавляя попытки перехвата.

Интеграция Sensing и связи (ISAC): Возможность RIS не только отражать, но и "чувствовать" параметры электромагнитного поля и перемещение объектов (например, прохождение человека рядом с поверхностью) открывает путь к бесшовной интеграции высокоточной радиолокации, зондирования и сверхскоростной передачи данных.

RIS и THz-диапазон: Как было подробно рассмотрено ранее, терагерцовые волны крайне чувствительны к затуханию и блокировке. RIS становится обязательным спутником THz-связи, компенсируя высокие потери на трассе и создавая виртуальные линии прямой видимости в условиях плотной городской застройки.

RIS и ИИ в радиоканале: Управление тысячами элементов RIS в реальном времени — задача не для жесткого алгоритма. Искусственный интеллект будет основой Native-AI для 6G, позволяя постоянно пересчитывать оптимальные фазовые сдвиги RIS при перемещении любого пользователя или изменении погодных условий.

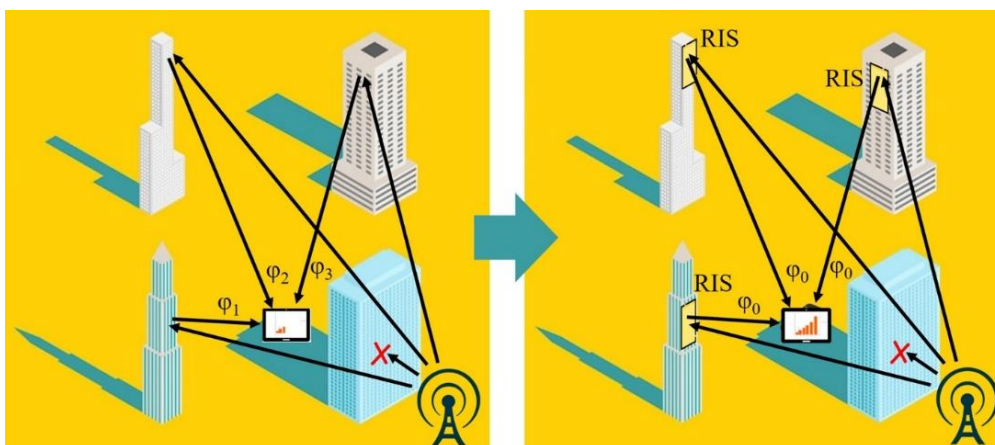


Рис. 2. Пример применения RIS поверхностей

Нативный искусственный интеллект (Native-AI) — «мозг» сети

Сети 5G стали платформой для пионерного внедрения искусственного интеллекта (ИИ), где он использовался как надстройка для оптимизации. Однако концепция 6G подразумевает кардинальный сдвиг парадигмы. ИИ здесь будет не просто прикладным инструментом, а фундаментом, «мозгом» сети, заложенным в

её архитектуру с самого начала. Это качество называется нативным (встроенным) искусственным интеллектом (Native-AI). По прогнозам разработчиков стандартов, неотъемлемой частью следующего поколения станет именно «AI-native networking» — сети со встроенным интеллектом. Экосистема 6G рассматривается как единое целое, где ИИ пронизывает все уровни — от физического (механизмы передачи сигналов) до уровня управления и верификации сервисов.

Интеллектуальный радиоинтерфейс

В 5G ИИ обслуживал RAN (радиосеть доступа) в основном через управляющие приложения. В 6G алгоритмы глубокого обучения встраиваются в самые низкоуровневые элементы. Например, AI/ML может использоваться на физическом уровне, заменяя классические алгоритмы обработки сигналов нейросетевыми автокодировщиками для модуляции, демодуляции или оценки состояния канала, что позволяет системе адаптироваться к сложным и быстро меняющимся условиям (например, при работе в новых частотных диапазонах, включая FR3 или терагерцовый диапазон).

Оркестрация ресурсов с помощью агентного ИИ

Искусственный интеллект становится «дирижёром» сети, управляющим сложнейшим континуумом «облако-туман-периферия». Языковые модели и алгоритмы обучения с подкреплением уже сейчас применяются для решения конфликтов между управляющими приложениями в реальном времени и перераспределения вычислительных мощностей (GPU) между RAN-функциями и ИИ-ворклоадами. Пропускная способность и энергоэффективность сетей будущего радикально изменятся после внедрения интенционального управления (Intent-Driven Communication): оператор задает высокоуровневую цель (интент), а ИИ-агенты сети самостоятельно переводят её в последовательность технических политик и действий на всех доменах.

Интеграция с RIS

Технология «Умных поверхностей» (RIS) неразрывно связана с Native-AI. Алгоритмы обучения с подкреплением активно применяются для динамической конфигурации тысяч отражательных элементов RIS и эффективного управления ими в реальном времени, чтобы перенаправлять радиоволны в обход препятствий и минимизировать помехи без использования точной информации о канале (Channel State Information, CSI).

Заключение

С 2025 года наблюдается бурный прогресс в стандартизации. В марте 2026 года в г. Инчхон прошёл семинар 3GPP по 6G, на котором координация между консорциумом 3GPP и альянсом O-RAN была признана критически важной для успеха AI-native сетей. На Mobile World Congress 2026 уже было продемонстрировано, как ведущие производители чипсетов совместно разрабатывают прототипы оборудования, закладывая основу для появления устройств 6G после 2030 года. Наиболее значительным событием на пути внедрения Native-AI стала ратификация стандарта IEEE 802.11bn, который не только увеличил скорость Wi-Fi, но и впервые в глобальном масштабе заложил механизмы «радиоуправляемого ИИ» (AI/ML-Phy), наглядно подтвердив жизнеспособность и востребованность AI-native технологий на практике. Ведутся также работы по созданию отраслевых эталонов (бенчмарков) 6G для тестирования возможностей рассуждения AI-агентов в реалистичных условиях развёртывания сети, что является важным шагом для перехода от исследовательских концепций к практическим стандартам.

Концепция нативного ИИ превращает сеть 6G из пассивного транспортного кабеля в активный, самообучающийся организм. Native-AI меняет фундаментальные принципы передачи данных (от семантики до физического уровня), управления ресурсами и взаимодействия с «умными» поверхностями. От мечты о самоорганизующихся телекоммуникациях отрасль перешла к конкретным архитектурам и прототипам, активно развивая и стандартизируя ключевые компоненты для сетей будущего.

Список использованных источников

1. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11059460>.
2. <https://arxiv.org/html/2305.13887v5>.
3. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10707308>.
4. <https://www.keysight.com/blogs/en/inds/2025/11/18/ai-ml-will-dominate-6g-starting-with-the-phy>.
5. <https://arxiv.org/html/2305.13887v5>.
6. <https://arxiv.org/html/2604.26408v1>.
7. <https://browse-export.arxiv.org/abs/2604.22706>.
8. <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2107.05460>.
9. <https://shalaginov.com/2023/03/17/5g-6g-reconfigurable-intelligent-surface-ris/>.
10. <https://iccc2025.ieee-iccc.org/ai-native-ran-architecture-and-key-technologies-6g>.