



МЕТОДЫ ИНТЕГРАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СВЯЗИ В АРХИТЕКТУРЕ СЕТЕЙ 6G

Хайдаралиева Хилола Фарход кизи

hilolahaydaraliyeva@gmail.ru

ассистент преподаватель Ташкентского университета

Мухаммада Ал-Хоразмий

Эргашова Дурдона Хусниддин кизи

durdonaergasheva676@gmail.com

студент 3 курса Ташкентский университет информационных технологий

имени Мухаммада Ал-Хоразмий

Аннотация; *Сети шестого поколения (6G) предполагают существенный рост пропускной способности, снижение задержек и поддержку ультраплотных подключений. Одной из ключевых технологий, обеспечивающих эти характеристики, является терагерцовая связь (THz), работающая в диапазоне 0.1–10 ТГц. В данной статье рассматриваются основные требования к THz-коммуникациям, ключевые вызовы их внедрения в архитектуру 6G, а также возможные методы оптимизации, включая формирование лучей, интеллектуальные поверхности и технологии компенсации потерь. Обоснована необходимость координированного развития аппаратных, программных и сетевых решений для реализации устойчивых и энергоэффективных терагерцовых систем связи.*

Ключевые слова: *6G, терагерцовая связь, THz, beamforming, интеллектуальные поверхности, оптимизация сети, ультранизкая задержка, телекоммуникационные технологии.*

Введение

Рост количества мобильных устройств, развитие Интернета вещей (IoT), распространение приложений расширенной и виртуальной реальности, а также требования к голографической и тактильной связи — все это определяет глобальный переход к 6G. Среди технологий, обеспечивающих скорости на уровне терабит/с, ключевую роль играет терагерцовая связь (THz), обеспечивающая широчайший спектр частот и потенциал для сверхвысокоскоростной передачи данных.

Однако внедрение THz-связи в реальные телекоммуникационные архитектуры связано с рядом физических, технологических и сетевых вызовов, требующих комплексных решений. Цель данной работы — анализ этих вызовов и определение методов оптимизации в контексте 6G.



Технические требования к терагерцовой связи в 6G



Терагерцовая связь предполагает следующие ключевые характеристики:

- Пропускная способность: более 100 Гбит/с, с потенциальным ростом до 1 Тбит/с.
- Задержка: менее 1 мс — для приложений URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication).
- Надежность: $\geq 99.999\%$ для промышленных и критически важных сценариев.
- Плотность подключений: до 10^7 устройств на км².

Для обеспечения таких параметров необходимо внедрение новых физических каналов передачи, новых типов антенн и модемов, а также адаптивной архитектуры сети.

Основные вызовы интеграции терагерцовой связи

Терагерцовая (THz) связь, охватывающая диапазон частот от 0.1 до 10 ТГц, предлагает беспрецедентную пропускную способность и крайне низкую задержку. Однако переход от лабораторных прототипов к практической интеграции в телекоммуникационную инфраструктуру 6G сталкивается с рядом серьёзных технических и системных препятствий.

Физические ограничения

- Высокие потери при распространении сигнала

Терагерцовые волны подвержены сильному затуханию, особенно из-за поглощения водяным паром и кислородом в атмосфере. Это ограничивает дальность действия до десятков метров даже при прямой видимости (LoS).

- Уязвимость к преградам и погодным условиям

THz-сигналы плохо проникают сквозь стены, деревья, дождь и даже туман, что делает внедрение в городскую среду крайне сложным без дополнительных ретрансляторов или интеллектуальных поверхностей.

▪ Недостаток компактных приёмопередатчиков

На сегодняшний день отсутствует массово доступная, миниатюрная и энергоэффективная элементная база (антенны, усилители, модуляторы), работающая стабильно в диапазоне выше 1 ТГц.

Методы оптимизации и возможные решения

Формирование направленного луча (beamforming)

Beamforming (формирование направленного луча) — это технология, позволяющая направленно передавать или принимать сигнал, концентрируя радиоволны в определённую область пространства, а не распространять их во всех направлениях, как в традиционных антеннах.

Это достигается путём фазового управления множеством антенн в массиве (antenna array), создающего конструктивную интерференцию в нужном направлении и деструктивную — в остальных.

Использование активных антенных решёток (AAS) и адаптивного формирования луча позволяет компенсировать ослабление сигнала, особенно в условиях городской застройки.

Заключение

Интеграция терагерцовой связи в архитектуру 6G открывает путь к реализации сверхвысокоскоростных, интеллектуальных и масштабируемых телекоммуникационных сетей. Однако успех зависит от преодоления физических ограничений, разработки новых стандартов и внедрения адаптивных архитектур. Использование beamforming, интеллектуальных отражающих поверхностей, гибридных протоколов и архитектур с многодиапазонной поддержкой является ключом к эффективной реализации THz-связи. В ближайшие годы исследования и пилотные проекты в этом направлении станут основой для коммерческого внедрения 6G к 2030 году.

Список литературы

1. Rappaport T. S., Xing Y., MacCartney G. R. и др. Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond // IEEE Access. – 2019. – Т. 7. – С. 78729–78757.
2. Xiao M., Shakir M. Z., Li Y., Ghosh A. A Survey on Millimeter Wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless Communications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 1654–1685.
3. Kürner T., Priebe S. Towards THz Communications – Status in Research, Standardization and Regulation // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2021. – Т. 42. – С. 1–25.



4. Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C. C. Advances in Terahertz Communications Accelerated by Photonics // Nature Photonics. – 2016. – Т. 10. – С. 371–379.
5. Chen S., Zhao J. The Requirements, Challenges, and Technologies for 6G Mobile Wireless Networks // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Т. 58, №3. – С. 36–42.
6. Boulogeorgos A.-A. A., Alexiou A. A Comprehensive Survey on Terahertz Communications (TeraCom) for 6G Wireless Systems // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2020. – Т. 1. – С. 1901–1932.
7. Akyildiz I. F., Kak A., Nie S. 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems // Springer. – 2023. – 478 с.
8. ITU-R. IMT Vision for 2030 and Beyond [Электронный ресурс]. – Geneva: ITU, 2022. – Режим доступа: <https://www.itu.int>

