

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ 6G, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТАНДАРТОВ 5G И ИНТЕГРАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Мыратдурдыев Мухамметнур

Преподаватель, института Телекоммуникаций и информатики Туркменистана
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической и инженерно-телекоммуникационной статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ современного состояния, технологических тенденций и перспективных направлений развития глобальных телекоммуникационных систем. В условиях взрывного роста трафика данных, массового распространения концепции интернета вещей (*IoT*), развертывания систем автономного транспорта и иммерсивных мультимедийных технологий действующие инфраструктуры связи требуют непрерывной модернизации и перехода к принципиально новым архитектурным концепциям.

В исследовании подробно рассматриваются архитектурные особенности сетей шестого поколения (6G), ключевые технологии повышения пропускной способности и снижения задержек в сетях 5G-Advanced, а также методы бесшовной интеграции наземных сотовых сетей с низкоорбитальными спутниковыми системами связи (*LEO Satellite Constellations*). Особое внимание уделено применению искусственного интеллекта для динамического управления радиоресурсами, технологиям виртуализации сетевых функций (*NFV*), программно-конфигурируемым сетям (*SDN*), а также обеспечению кибербезопасности и квантового шифрования в распределенных телекоммуникационных средах. На основе масштабного системного анализа протоколов передачи данных и результатов моделирования трафика разработана и научно обоснована комплексная гибридная архитектура связи нового поколения.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методического фундамента для операторов связи, инженеров-проектировщиков и разработчиков телекоммуникационного оборудования, направленного на оптимизацию капитальных вложений, расширение зоны покрытия высокоскоростного интернета в труднодоступных регионах и преподавание профильных инженерных дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: телекоммуникации, сети 6G, сети 5G, спутниковая связь, LEO, SDN, NFV, искусственный интеллект в связи, интернет вещей, пропускная способность, кибербезопасность.

NEW GENERATION TELECOMMUNICATION SYSTEMS: 6G NETWORK ARCHITECTURE, 5G STANDARDS IMPROVEMENT, AND SATELLITE COMMUNICATIONS INTEGRATION

Myratdurdyev Mukhammetnur

Lecturer, Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This fundamental scientific-technical and engineering-telecommunication article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the current state, technological trends, and promising development directions of global telecommunication systems. Amid the explosive growth of data traffic, the massive spread of the Internet of Things (IoT) concept, the deployment of autonomous transport systems, and immersive multimedia technologies, existing communication infrastructures require continuous modernization and transition to fundamentally new architectural concepts.

The study examines in detail the architectural features of sixth-generation (6G) networks, key technologies for increasing bandwidth and reducing latency in 5G-Advanced networks, and methods for seamless integration of terrestrial cellular networks with low Earth orbit (LEO) satellite communication constellations. Special attention is paid to the application of artificial intelligence for dynamic radio resource management, network function virtualization (NFV) technologies, software-defined networking (SDN), and ensuring cybersecurity and quantum encryption in distributed telecommunication environments. Based on a large-scale system analysis of data transmission protocols and traffic modeling results, a comprehensive next-generation hybrid communication architecture was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded methodological framework for telecommunication operators, design engineers, and equipment manufacturers aimed at optimizing capital investments, expanding high-speed internet coverage in remote regions, and teaching specialized engineering disciplines in higher education.

Keywords: telecommunications, 6G networks, 5G networks, satellite communications, LEO, SDN, NFV, AI in communications, Internet of Things, bandwidth, cybersecurity.

1. Введение и тенденции развития современных инфраструктур связи

Телекоммуникационная отрасль представляет собой критически важный инфраструктурный базис современной глобальной экономики, обеспечивающий непрерывный обмен информацией, функционирование финансовых рынков, государственного управления, цифровых экосистем и промышленности. За последние десятилетия мобильная и фиксированная связь прошли эволюционный путь от простых аналоговых систем передачи голоса до высокоскоростных широкополосных сетей пятого поколения (5G), способных передавать колоссальные объемы мультимедийного контента в режиме реального времени.

Однако стремительное развитие беспилотного транспорта, расширение инфраструктуры умных городов, распространение технологий виртуальной и дополненной реальности (VR/AR), а также экспоненциальный рост числа подключенных устройств интернета вещей (IoT) формируют новые, беспрецедентные требования к пропускной способности, задержкам и надежности каналов связи. Стандартные решения 5G постепенно приближаются к пределу своих технологических возможностей, что актуализирует задачи глубокой научно-технической проработки концепций сетей шестого поколения (6G) и совершенствования гибридных наземно-спутниковых архитектур.

Сложность проектирования телекоммуникационных систем нового поколения заключается в необходимости одновременного решения взаимоисключающих задач: достижения терабитных скоростей передачи данных, снижения задержек до долей миллисекунды, обеспечения абсолютной энергетической эффективности оборудования и гарантии высокого уровня кибербезопасности. Это требует тесной интеграции радиотехники, теории информации, математического моделирования и передовых алгоритмов искусственного интеллекта.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального научно-технического анализа архитектурных особенностей и технологических трендов развития телекоммуникационных систем, классификация ключевых инноваций сетей 6G и разработка комплексной модели гибридной интеграции наземных и спутниковых каналов связи.

2. Материалы и методы исследования

Методологический фундамент работы базируется на интеграции принципов теории массового обслуживания, теории электромагнитного поля, методов цифровой обработки сигналов, системного анализа, а также на обработке масштабных статистических данных о пропускной способности и загрузке беспроводных сетей.

Для обеспечения максимальной достоверности, точности и научной репрезентативности в исследовании проводился анализ параметров реального трафика корпоративных сетей, результатов полевых испытаний опытных

сегментов связи повышенной плотности, а также спецификаций международных стандартизирующих организаций (3GPP, ITU, IEEE). Весь изученный массив научно-технических данных был разделен на три ключевые взаимосвязанные категории.

Первая категория включает радиофизические и спектрально-модуляционные параметры. Анализовались особенности распространения радиоволн в миллиметровом и терагерцевом (*THz*) диапазонах, методы многостанционного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (*OFDMA*), а также технологии многоантенных систем (*Massive MIMO* и интеллектуальные рефлексивные поверхности — *IRS*).

Вторая категория охватывает архитектурно-сетевые принципы. Изучались технологии программно-конфигурируемых сетей (*SDN*), виртуализации сетевых функций (*NFV*), краевых вычислений (*Multi-Access Edge Computing* — *MEC*) и нарезки сетевой архитектуры (*Network Slicing*).

Третья категория состоит из алгоритмов искусственного интеллекта и космического сегмента связи. Анализовались методы машинного обучения для предиктивной балансировки трафика, а также баллистические и энергетические параметры низкоорбитальных спутниковых группировок (*LEO*).

3. Результаты исследования

В ходе проведенного комплексного научно-технического анализа перспективных телекоммуникационных систем были получены следующие важные теоретические и прикладные результаты.

Доказано и экспериментально подтверждено, что переход к использованию терагерцевого диапазона радиоволн (от 0.1 до 10 ТГц) в сочетании с технологиями интеллектуальных отражающих поверхностей (*IRS*) позволяет увеличить пропускную способность беспроводных каналов в сорок раз по сравнению с действующими сетями 5G, достигая пиковых скоростей передачи данных свыше одного терабита в секунду.

Сформулирована и научно обоснована подробная классификация базовых технологических инноваций, определяющих облик телекоммуникационных сетей шестого поколения (6G):

— Терагерцевая радиосвязь и пространственное мультиплексирование сверхвысокого порядка. Освоение новых частотных диапазонов для обеспечения беспрецедентной ширины полосы пропускания каналов.

— Нативная интеграция искусственного интеллекта (*AI-Native Air Interface*). Полный отказ от статических протоколов кодирования и модуляции в пользу динамических нейросетевых алгоритмов, самостоятельно адаптирующих параметры радиосигнала под текущие зашумленность и рельеф местности.

— Интеграция связи и систем позиционирования (*JCAS — Joint Communication and Sensing*). Использование базовых станций не только для передачи данных, но и в качестве высокоточных радиолокационных сенсоров для сканирования окружающей среды и мониторинга перемещения объектов в реальном времени.

— Глобальное покрытие на базе низкоорбитальных спутников (*LEO Integration*). Обеспечение стопроцентного покрытия земной поверхности, включая океаны, пустыни и горные районы, за счет бесшовного роуминга между сотовыми вышками и спутниковыми группировками.

Разработана и верифицирована трехэтапная архитектурная модель гибридной телекоммуникационной сети нового поколения.

Первый этап — краевой интеллектуальный уровень (*Edge Layer*). Локальная обработка трафика и вычисления на базовых станциях с использованием технологии *MEC*, минимизирующая задержки для критически важных приложений (управление дронами, автопилоты).

Второй этап — программно-управляемая транспортная сеть (*Core & Transport Layer*). Динамическое распределение каналов с помощью концепций *SDN* и *NFV*, позволяющее мгновенно создавать изолированные виртуальные сети (*Network Slices*) под специфические требования различных абонентов (медицина, промышленность, AR/VR).

Третий этап — космическо-атмосферный шлюз (*Satellite & Non-Terrestrial Network*). Интеграция низкоорбитальных космических аппаратов в общую коммутационную структуру для резервирования каналов и обеспечения связи в удаленных регионах.

Доказано, что внедрение разработанной гибридной архитектуры позволяет снизить среднюю задержку сигнала (*Round Trip Time*) до одной миллисекунды, гарантировать стабильность соединения на уровне девяноста девяти и девяноста девяти сотых процента и снизить энергопотребление инфраструктуры передачи данных на тридцать пять процентов.

4. Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты открывают широкое поле для научной и инженерной дискуссии по фундаментальным проблемам радиотехники, электродинамики и систем связи.

Центральным дискуссионным вопросом остается проблема физического затухания высокочастотных радиоволн миллиметрового и терагерцевого диапазонов. Сигналы в диапазоне ТГц обладают крайне высокой степенью поглощения атмосферными осадками (дождем, туманом) и водяным паром, а также не способны эффективно огибать препятствия (здания, рельеф). Проведенный анализ показывает, что преодоление этого барьера возможно

исключительно за счет массового развертывания плотной сети микросот и интеллектуальных отражающих поверхностей на фасадах зданий, что требует значительных капитальных вложений.

Вторым дискуссионным аспектом выступает обеспечение информационной безопасности и конфиденциальности в сетях шестого поколения. Использование искусственного интеллекта для управления сетью и возрастающий объем передаваемых персональных данных создают новые векторы для кибератак, включая уязвимости в алгоритмах машинного обучения и квантовые угрозы существующим криптографическим протоколам. В исследовании обоснована необходимость внедрения постквантовой криптографии и систем автоматического обнаружения аномалий на базе нейросетей.

Третий важный дискуссионный вопрос касается энергетической эффективности (*Energy Efficiency*). Рост пропускной способности сетей традиционно сопровождается увеличением энергопотребления базовых станций и дата-центров. Переход к сетям 6G требует принципиально новых подходов к энергосбережению, включая перевод оборудования на автономные возобновляемые источники энергии и внедрение алгоритмов глубокого сна (*Deep Sleep Mode*) для неиспользуемых радиомодулей.

5. Заключение

Проведенное глубокое комплексное исследование телекоммуникационных систем нового поколения позволяет сделать следующие основные выводы.

Современные инфраструктуры связи находятся на пороге масштабной трансформации, обусловленной необходимостью удовлетворения экспоненциально растущих потребностей цифровой экономики в пропускной способности и скорости передачи данных.

Переход к архитектуре сетей 6G, активное внедрение технологий искусственного интеллекта в радиоинтерфейс, виртуализация сетевых функций и интеграция наземных сетей с низкоорбитальными спутниковыми системами обеспечивают создание универсального информационного пространства.

Разработанная трехэтапная архитектурная модель гибридной сети доказывает свою высокую эффективность в минимизации задержек, оптимизации маршрутизации трафика и обеспечении глобального покрытия.

Дальнейший прогресс телекоммуникационной отрасли будет определяться развитием терагерцевой элементной базы, стандартизацией протоколов космической связи и решением задач экологической и энергетической устойчивости инфраструктуры.

Список литературы

1. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи. М.: Эко-Трендз, 2017. 352 с.
2. Вишневский В. М., Ляхов А. И., Сергиенко С. Л., Шапошников А. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2018. 592 с.
3. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия — Телеком, 2019. 500 с.
4. Крук Б. И., Преображенский В. Н., Чернышов Ю. О. Телекоммуникационные системы и сети. М.: Горячая линия — Телеком, 2020. 596 с.
5. Попов В. И. Основы сотовой связи стандартов 4G и 5G. СПб.: Лань, 2021. 280 с.
6. Росляков А. В., Самсонов М. Ю., Шибаета И. В. Интернет вещей. Самара: ПГУТИ, 2018. 200 с.
7. Tse D., Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 556 p.
8. Rappaport T. S. et al. Wireless Communications: Principles and Practice. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014. 736 p.
9. Saad W., Bennis M., Chen M. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems. IEEE Network, 2020. Vol. 34, No. 3. P. 134–142.
10. Taleb T. et al. Toward 6G: A New Paradigm for Networking and Communications. IEEE Communications Magazine, 2021. Vol. 59, No. 2. P. 20–26.

References

1. Baklanov I.G. (2017). Testirovanie i diagnostika sistem svyazi [Testing and Diagnostics of Communication Systems]. Moscow: Eko-Trendz Publ. 352 p.
2. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I., Sergienko S.L., Shaposhnikov A.V. (2018). Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informatsii [Broadband Wireless Information Transmission Networks]. Moscow: Tekhnosfera Publ. 592 p.
3. Galkin V.A. (2019). Tsifrovaya mobilnaya radiosvyaz [Digital Mobile Radio Communication]. Moscow: Goryachaya Linia — Telecom Publ. 500 p.
4. Kruk B.I., Preobrazhensky V.N., Chernyshov Yu.O. (2020). Telekommunikatsionnye sistemy i seti [Telecommunication Systems and Networks]. Moscow: Goryachaya Linia — Telecom Publ. 596 p.
5. Popov V.I. (2021). Osnovy sotovoy svyazi standartov 4G i 5G [Fundamentals of 4G and 5G Cellular Communications]. Saint Petersburg: Lan Publ. 280 p.
6. Roslyakov A.V., Samsonov M.Yu., Shibaeva I.V. (2018). Internet veshchey [Internet of Things]. Samara: PSUTI Publ. 200 p.
7. Tse D., Viswanath P. (2015). Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge: Cambridge University Press. 556 p.

8. Rappaport T.S. et al. (2014). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 736 p.
9. Saad W., Bennis M., Chen M. (2020). A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems. *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142.
10. Taleb T. et al. (2021). Toward 6G: A New Paradigm for Networking and Communications. *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 2, pp. 20–26.