

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПРОВОДНОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА В МНОГОКАНАЛЬНОЙ СВЯЗИ

С.С. Веркин, канд. техн. наук

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-5-1-279-283

Аннотация. В статье рассматриваются современное состояние и перспективы развития технологий беспроводного широкополосного доступа (БШПД) в контексте многоканальных систем связи. Анализируются ключевые технологические решения, включая системы MIMO (Multiple Input Multiple Output), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), технологии множественного доступа, а также архитектурные подходы к построению сетей 5G и 6G поколений. Особое внимание уделяется методам повышения спектральной эффективности, пропускной способности и надежности многоканальной связи. Рассматриваются практические применения БШПД в различных сценариях: от фиксированного беспроводного доступа до промышленного интернета вещей и спутниковых систем. На основе анализа современных тенденций и прогнозов развития отрасли формулируются основные направления дальнейших исследований и инноваций в данной предметной области.

Ключевые слова: беспроводной широкополосный доступ; многоканальная связь; MIMO; OFDM; 5G; 6G; множественный доступ; спектральная эффективность; Massive MIMO; NOMA.

Современный этап развития телекоммуникационных систем характеризуется стремительным ростом объемов передаваемых данных, увеличением числа подключенных устройств и ужесточением требований к качеству обслуживания. В этих условиях беспроводной широкополосный доступ (БШПД) становится одной из ключевых технологий, обеспечивающих высокоскоростную передачу информации в различных сценариях использования.

Актуальность темы обусловлена несколькими факторами. Во-первых, наблюдается устойчивый тренд на увеличение доли беспроводного трафика в общем объеме передачи данных. По прогнозам аналитиков, на беспроводной доступ будет приходиться не менее 70% запросов пользователей к облачным приложениям, что существенно влияет на бизнес-модели операторов связи. Во-вторых, развитие таких направлений, как интернет вещей (IoT), промышленные сети, умные города и автономные транспортные системы, требует создания инфраструктуры, способной одновременно обслуживать огромное количество абонентских устройств с различными требованиями к скорости, задержкам и надежности. В-третьих, ограниченность ча-

стотного ресурса и необходимость повышения спектральной эффективности стимулируют поиск новых методов организации многоканальной связи.

Целью выполненного исследования является системный анализ перспективных направлений развития беспроводного широкополосного доступа в многоканальных системах связи, а также выявление ключевых технологических трендов, определяющих эволюцию данной предметной области на ближайшие годы.

Эволюция технологий беспроводного широкополосного доступа

Технологии БШПД прошли длительный путь эволюции, начиная от простых систем «точка-точка» до сложных многоканальных архитектур, способных обслуживать тысячи абонентов одновременно. Основными вехами в рамках развития БШПД стало принятие стандартов IEEE 802.11n (Wi-Fi 4) в 2009 году и IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) в 2013 году, которые принесли технологию MIMO, агрегацию пакетов и более эффективные методы модуляции [1, 2].

Важное место в истории БШПД занимают системы многоканального многоточечного распределения (MMDS – Multichannel

Multipoint Distribution System), представляющие собой многоканальные беспроводные сети, обеспечивающие широкополосный и высокоскоростной доступ в Интернет по радиоканалам связи в частотном диапазоне 2150-2165 МГц. Такие системы реализуют топологию «точка-многоточка», где каждая базовая станция обслуживает территориально разнесенных абонентов, при этом абонентские станции взаимодействуют исключительно через базовую станцию [4].

Параллельно развивались сотовые стандарты широкополосного доступа. Технология LTE, а затем и 5G, заложили основу для универсальных систем связи, объединяющих широкополосный доступ, голосовые услуги и передачу данных в единой инфраструктуре. Важно отметить, что БШПД многогранен: он может быть основан на сотовых стандартах LTE и 5G, спутниковом доступе, решениях WiMAX и Wi-Fi, каждый из которых имеет свою область применения и характеристики.

Многоканальные архитектуры и методы организации связи

Современные системы БШПД строятся на основе многоканальных архитектур, которые позволяют эффективно использовать доступный частотный ресурс. Ключевыми методами организации многоканальной связи являются частотное, временное и кодовое разделение каналов, а также их комбинации.

Технология OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) стала основой большинства современных систем широкополосного доступа. OFDM использует множество ортогональных поднесущих, что обеспечивает высокую спектральную эффективность и устойчивость к многолучевому распространению сигнала. В сочетании с MIMO-обработкой OFDM позволяет достичь значительного увеличения пропускной способности канала. В работах отечественных исследователей приведены результаты разработки адаптивных пространственно-временных алгоритмов в MIMO-системах связи, основанных на OFDM-модуляции в линии беспроводного доступа на антенных решетках [6].

Стандарт IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) внедрил технологию OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) для нисходящего канала, которая позволяет распределять ресурсные блоки между несколькими пользователя-

ми одновременно. Этот стандарт поддерживает три режима многопользовательской передачи: OFDMA (разные части полосы разным пользователям), MU-MIMO (разные пространственные потоки разным пользователям в одной полосе) и комбинированный режим. Такая гибкость позволяет адаптировать параметры передачи под конкретные требования пользователей и условия канала [8].

Технологии MIMO и Massive MIMO

Системы с множеством входов и выходов (MIMO) являются фундаментальной технологией для повышения пропускной способности беспроводных каналов. MIMO использует многолучевое распространение радиоволн для создания нескольких независимых пространственных каналов, что позволяет передавать несколько потоков данных одновременно.

Дальнейшим развитием концепции MIMO стали системы Massive MIMO, в которых базовые станции оснащаются десятками или даже сотнями антенных элементов. Такие системы позволяют одновременно обслуживать большое количество пользователей, используя пространственное разделение каналов. Ведущими исследователями показано, что с помощью объединения технологий Massive MU-MIMO и NOMA можно реализовать разделение каналов сразу в четырех доменах: частота, время, пространство и мощность [10].

Важным направлением является адаптация Massive MIMO для различных частотных диапазонов. Компания Huawei недавно верифицировала для коммерческого использования технологию Massive MIMO для частот ниже 1 ГГц (диапазоны 700 МГц, 800 МГц и 900 МГц). Прорыв заключается в совмещении технологий чрезвычайно большой антенной решетки (ELAA) и широкополосного доступа в низком диапазоне, что позволяет значительно повысить спектральную эффективность по сравнению с обычным оборудованием с конфигурацией 2T2R.

Перспективной архитектурой является концепция бессотовой Massive MIMO (Cell-Free massive MIMO), которая представляет собой практическую и масштабируемую реализацию распределенных/сетевых MIMO-систем. Эта инновационная архитектура демонстрирует значительный потенциал в улучшении производительности сети с различных точек зрения, превосходя как тради-

ционные системы с со-локализованной mMIMO, так и обычные системы с малыми сотами.

Методы множественного доступа следующего поколения

Одной из ключевых проблем современных систем связи является разработка эффективных методов множественного доступа, позволяющих обслуживать растущее число пользователей в условиях ограниченного частотного ресурса. Для сетей связи шестого поколения (6G) эта проблема становится особенно острой, поскольку ожидается, что сети 6G должны на порядок превосходить сети 5G по эффективности передачи данных.

Среди перспективных методов множественного доступа следует выделить группу неортогональных методов NOMA (Non Orthogonal Multiple Access) и метод множественного доступа с разделением абонентов по скорости RSMA (Rate Splitting Multiple Access). Эти подходы позволяют обслуживать нескольких пользователей в одном частотно-временном ресурсе за счет использования разницы в уровнях мощности или скорости передачи [3].

Однако, как отмечают исследователи, несмотря на очевидные преимущества, ни один из этих методов пока не был внедрен в коммерческие системы 5G по нескольким причинам: высокая вычислительная сложность алгоритмов обработки сигналов, недостаточная проработка теоретических основ и технологические ограничения. Тем не менее, для сетей 6G эти методы рассматриваются как перспективные направления исследований.

Спектральная эффективность и использование частотного ресурса

Проблема эффективного использования частотного спектра становится все более актуальной по мере насыщения доступных диапазонов. Современные исследования направлены на оптимизацию спектрального использования частотного ресурса путем интеграции технологий beamspace MIMO, NOMA, полнодуплексных D2D-коммуникаций и многоуровневого мультиплексирования (LDM).

Развитие технологий 6G предполагает работу в широком частотном диапазоне – от стандартных микроволн до волн с частотой в несколько терагерц. Китайские ученые из Пекинского университета и Городского универ-

ситета Гонконга представили первый в мире мультимедийный чип 6G, способный поддерживать скорость мобильного интернета более 100 Гбит/с в диапазоне частот от 0,5 до 115 ГГц. Обычно для покрытия такого диапазона необходимо не менее девяти отдельных радиосистем [9, 10].

В исследовательских лабораториях демонстрируются еще более впечатляющие результаты: исследователи Университетского колледжа Лондона передали данные по беспроводной сети со скоростью 938 гигабит в секунду, что в 9000 раз превышает среднюю скорость сетей 5G. Японские телекоммуникационные компании разработали высокоскоростной беспроводной гаджет 6G, который может передавать данные со скоростью, в 20 раз превышающей скорость 5G.

Практические применения в различных сценариях

Технологии БШПД находят применение в широком спектре сценариев – от предоставления услуг широкополосного доступа населению до организации промышленных сетей и спутниковой связи.

Фиксированный беспроводной доступ (Fixed Wireless Access, FWA). Broadband Forum опубликовал технический отчет, описывающий обеспечение нескольких квартир в многоквартирных домах гигабитным широкополосным подключением через одно соединение 5G FWA с использованием существующей внутренней кабельной инфраструктуры здания. Для гигабитных или многогигабитных скоростей требуется использование высокочастотного диапазона mmWave на частотах 24-40 ГГц, что предъявляет особые требования к архитектуре размещения оборудования.

Промышленные сети и частные сети связи. Особого внимания заслуживают частные сети LTE (Private LTE, PrLTE) – выделенные сети беспроводной широкополосной связи, предназначенные для сбора, передачи и обработки данных цифровых сервисов, а также телеметрии производственных точек. Активное внедрение IoT и M2M-решений способствует увеличению спроса на PrLTE-сети.

Сверхширокополосные микроволновые решения. Компания Huawei представила решение SuperLink – многодиапазонное решение беспроводной передачи данных, объединяющее несколько распространенных диапа-

зонов частот в широкополосный и протяженный канал связи с полосой пропускания 10 Гбит/с при использовании одной антенны и одного канала. Критическим компонентом решения является четырехдиапазонная антенна, работающая в диапазонах 6/7/8/11 ГГц одновременно [6, 7].

Сельская местность и удаленные регионы. Широкополосный доступ на базе Wi-Fi рассматривается как экономически эффективный способ расширения зоны покрытия и инструмент устранения цифрового неравенства, особенно в регионах с низкой плотностью населения. По оценкам, в сельской местности по всему миру насчитывается более 2,9 миллиарда пользователей, у которых нет доступа к Интернету.

Перспективы развития и технологические вызовы

Анализ современных тенденций позволяет выделить несколько ключевых направлений развития БШПД в многоканальных системах связи на ближайшую перспективу.

Технологии 6G и интеллектуальные сети. Ожидается, что коммерческие сети 6G начнут разворачиваться около 2030 года. Ключевыми особенностями 6G станут интеграция с системами искусственного интеллекта, которые будут управлять сетями и оптимизировать их работу в режиме реального времени, а также поддержка сверхскоростного соединения с низкой задержкой.

Терагерцовый диапазон. Освоение терагерцового диапазона открывает новые возможности для беспроводной связи, но требует решения фундаментальных проблем, связанных с распространением сигнала, разработкой новых материалов и компонентов.

Интеграция разнородных технологий. Перспективным направлением является интеграция различных технологий БШПД в единую унифицированную инфраструктуру, способную адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям пользователей.

К числу основных технологических вызовов можно отнести:

- обеспечение электромагнитной совместимости при работе в плотно заселенных частотных диапазонах;

- разработка энергоэффективных алгоритмов обработки сигналов для систем Massive MIMO;

- создание программно-конфигурируемых радиосистем, способных работать в широком диапазоне частот;

- обеспечение надежности и помехоустойчивости связи в сложных условиях распространения сигнала.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что беспроводной широкополосный доступ в многоканальных системах связи находится на этапе активного развития, определяемого несколькими ключевыми тенденциями.

Во-первых, происходит эволюция технологической базы: от простых систем «точка-точка» к сложным многоканальным архитектурам с использованием MIMO, OFDM и методов множественного доступа следующего поколения. Технологии Massive MIMO и бесшовные архитектуры становятся основой для создания высокопроизводительных сетей, способных обслуживать растущее число пользователей.

Во-вторых, наблюдается расширение спектра применения БШПД. От классических задач предоставления доступа в Интернет технологии БШПД проникают в промышленность, транспорт, энергетику и другие отрасли, становясь критически важной инфраструктурой для цифровой трансформации экономики.

В-третьих, развитие сетей 6G открывает новые возможности для повышения пропускной способности и снижения задержек. Уже продемонстрированы скорости передачи, в тысячи раз превышающие возможности современных сетей 5G, а использование ИИ для управления сетями обещает качественно новый уровень адаптивности и эффективности.

Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на решение проблем электромагнитной совместимости, повышение энергетической эффективности оборудования, создание программно-конфигурируемых радиосистем и интеграцию разнородных технологий в единую инфраструктуру. Решение этих задач позволит полностью реализовать потенциал беспроводного широкополосного доступа в многоканальных системах связи и обеспечить потребности будущих поколений пользователей.

Библиографический список

1. Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Кузнецов В.С. Теория многоканальных широкополосных систем связи: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013. – 200 с.
3. Крейнделин В.Б., Бакулин М.Г., Бен Режеб Т.Б.К. и др. Неортогональный множественный доступ (NOMA) как основа систем связи 5G и 6G. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2024. – 264 с.
4. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Экотрендз, 2005. – 384 с.
5. Федосов В.П., Емельяненко А.В., Гладушенко С.Г., Поморцев П.М. Методы и алгоритмы многоканальной пространственной обработки широкополосных сигналов // Нелинейный мир. – 2012. – № 11. – С. 731-737.
6. Прорыв в 5G FWA: гигабитный интернет для МКД через существующие провода // Cableman.ru, 2025.
7. Mohammadi M., Mobini Z., Ngo H.Q., Matthaiou M. Next Generation Multiple Access with Cell-Free Massive MIMO // Proceedings of the IEEE, 2024.
8. Перспективные методы множественного доступа для будущих систем беспроводной связи 6G // Российский научный фонд, проект №22-79-10148.
9. Первый в мире мультимедийный чип 6G со скоростью более 100 Гбит/с разработан в Китае // ИТС.ua, 2025.
10. Massive MIMO для диапазона ниже 1 ГГц // Tochka5G, 2025.

PROSPECTS FOR USING WIRELESS BROADBAND ACCESS IN MULTICHANNEL COMMUNICATIONS

S.S. Verkin, *Candidate of Technical Sciences*

Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny (Russia, St. Petersburg)

***Abstract.** This article examines the current state and development prospects of broadband wireless access (BWBA) technologies in the context of multichannel communication systems. Key technological solutions are analyzed, including MIMO (Multiple Input Multiple Output), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), multiple access technologies, and architectural approaches to building 5G and 6G networks. Particular attention is paid to methods for increasing spectral efficiency, throughput, and reliability of multichannel communications. Practical applications of BWBA in various scenarios are considered, from fixed wireless access to the Industrial Internet of Things and satellite systems. Based on an analysis of current trends and industry development forecasts, key areas for further research and innovation in this subject area are identified.*

***Keywords:** wireless broadband; multi-channel communication; MIMO; OFDM; 5G; 6G; multiple access; spectral efficiency; Massive MIMO; NOMA.*