

Обзорная статья

УДК 004.725.5

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-68-77>

EDN:YUSEEH



Анализ эволюционного развития сетей Wi-Fi за первую четверть 21 века

Светлана Алексеевна Скоробогатова, skorobogatova.sa@sut.ru

Антон Сергеевич Викулов, vikulov.as@sut.ru

Александр Иванович Парамонов, paramonov@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Технология беспроводной передачи данных на основе стандарта IEEE 802.11 в настоящее время занимает одно из важнейших мест в сетях беспроводного доступа. С момента своего появления в 1997 г. к настоящему времени она прошла 28 лет активной технологической эволюции. WiMAX, существовавшая с 2001 г., практически исчезла из-за развития LTE, в то время как технология Bluetooth, появившаяся в 1999 г., продолжает развиваться. Обе технологии имели шанс заменить Wi-Fi. WiMAX первоначально должна была заполнить пробел между медленными сотовыми сетями и Wi-Fi, предлагая компромисс между мобильностью и скоростью. Bluetooth нашла свою нишу в M2M-сегменте. На сегодняшний день наблюдается выход на рынок дополнения IEEE 802.11be, а также первые результаты работы рабочей группы IEEE в рамках планов по выходу следующего дополнения – IEEE 802.11bn. За все прошедшее время было внесено множество улучшений на всех уровнях стека протоколов, и есть основания ожидать, что новое дополнение станет в некотором смысле технологически революционным.

Целью данной работы является выявление закономерностей в технологической эволюции стандарта IEEE 802.11 за прошедший период развития.

Методы. Анализ профессиональной и научной литературы, текстов стандартов и практики их использования в отрасли.

В ходе **решения** поставленной задачи в работе представлен обзор основных улучшений, сделанных в рамках стандарта за прошедшие годы, рассмотрены основные направления текущего этапа развития. Основное внимание уделяется цикличности технологической эволюции стандарта IEEE 802.11.

Новизна состоит в выявлении и описании закономерностей развития стандарта и его применения на практике.

Теоретическая значимость состоит в результатах анализа тенденций развития протоколов в рамках эволюции технологии. Также показано, что принятие новых дополнений стандарта IEEE 802.11 носит циклический характер, сочетающий революционные прорывы с эволюционными изменениями.

Практическая значимость. Полученный результат может быть использован в задачах анализа и прогнозирования дальнейшего эволюционных изменений технологии в свете ожидаемого перехода к восьмому поколению стандарта.

Ключевые слова: беспроводные сети, IEEE 802.11, эволюция стандартов

Ссылка для цитирования: Скоробогатова С.А., Викулов А.С., Парамонов А.И. Анализ эволюционного развития сетей Wi-Fi за первую четверть 21 века // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 68–77. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-68-77. EDN:YUSEEH

Review article
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-68-77>
EDN:YUSEEH

Analysis of Wi-Fi Networks Evolution During the First Quarter of the 21st Century

✉ Svetlana A. Skorobogatova, skorobogatova.sa@sut.ru
✉ Anton S. Vikulov, vikulov.as@sut.ru
✉ Alexandr I. Paramonov, paramonov@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Relevance. Wireless data transmission technology based on the IEEE 802.11 standard currently occupies a key place in wireless access networks. Since its introduction in 1997, it has undergone 28 years of active technological evolution. WiMAX, which existed since 2001, has virtually disappeared due to the development of LTE, while Bluetooth, which appeared in 1999, continues to evolve. Both technologies had the potential to replace Wi-Fi. WiMAX was initially intended to fill the gap between slow cellular networks and Wi-Fi, offering a compromise between mobility and speed. Bluetooth found its niche in the M2M segment. Today, we are seeing the rollout of the IEEE 802.11be amendment to the market, and the first results from the IEEE working group on the upcoming IEEE 802.11bn update. Over the years, standard has seen significant improvements across all layers of the protocol stack, and there is reason to expect that the new amendment will be, in some sense, technologically revolutionary.

The aim of this work is to identify patterns in the technological evolution of the IEEE 802.11 standard over the past period of development.

Methods. Analysis of professional and scientific literature, standards texts, and industry practices.

Speaking about its **objective**, this paper presents an overview of the key improvements made to the standard over the years past and examines the main areas of its current development. The focus is on the cyclical nature of the technological evolution of the IEEE 802.11 standard.

Its **novelty** lies in identifying and describing the patterns of the standard's development and its practical application. Its **theoretical significance** lies in the analysis of protocol development trends within the technology's evolution. It also demonstrates that the adoption of new additions to the IEEE 802.11 standard is cyclical, combining revolutionary breakthroughs with evolutionary changes.

Practical significance: The obtained results can be used to analyze and forecast further evolutionary changes in the technology in light of the expected transition to the eighth generation of the standard.

Keywords: wireless networks, IEEE 802.11, standards evolution

For citation: Skorobogatova S.A., Vikulov A.S., Paramonov A.I. Analysis of Wi-Fi Networks Evolution During the First Quarter of the 21st Century. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(6):68–77. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-6-68-77. EDN:YUSEEH

1. Введение

Рубеж XX и XXI вв. был ознаменован появлением и последующим бурным развитием разнообразных сетевых технологий. Среди них особое место занимают беспроводные технологии передачи данных, такие как Bluetooth, WiMAX, Wi-Fi, Zigbee, LoRaWAN и другие, не говоря уже о многочисленных мобильных сотовых технологиях. Однако сейчас, в конце

первой четверти XXI в., стандарт IEEE 802.11 несомненно занял ведущую позицию в технологиях беспроводных локальных вычислительных сетей (БЛВС). Необходимо отметить, что если ранее можно было в некотором смысле отождествлять сети стандарта IEEE 802.11 [1] и продукты, сертифицируемые Wi-Fi Alliance, то к 2024 г. стандарт

включает в себя достаточно много технологий, которые к термину «Wi-Fi», строго говоря, не относятся. Это, например, дополнения стандарта IEEE 802.11ad/ay («WiGig») и IEEE 802.11ah («Wi-HaLow»). Кроме того, несколько лет назад в рамках Wi-Fi Alliance появилось разделение Wi-Fi на так называемые «поколения»: сети, удовлетворяющие дополнению IEEE 802.11n (HT, *аббр. от англ. High Throughput*), стали именовать Wi-Fi 4; дополнение IEEE 802.11ac (VHT, *аббр. от англ. Very High Throughput*), относят к Wi-Fi 5; дополнение IEEE 802.11ax (HE, *аббр. от англ. High Efficiency*), относят к Wi-Fi 6; выходящее в данный момент дополнение IEEE 802.11be (EHT, *аббр. от англ. Extremely High Efficiency*), относят к Wi-Fi 7. В этом смысле обсуждаемое в статье будущее дополнение IEEE 802.11bn (UHR, *аббр. от англ. Ultra High Reliability*) должно стать восьмым поколением стандарта, т. е. Wi-Fi 8.

Сети Wi-Fi широко используются в различных областях:

- гостевой доступ в интернет для мобильных устройств;
- доступ к локальным сетям для корпоративных пользователей;

- промышленная автоматизация и телеметрия;
- эксплуатация устройств Интернета вещей (IoT, *аббр. от англ. Internet of Things*);
- различные варианты работы M2M-систем (*аббр. от англ. Machine-to-Machine*) и во многих других.

Первоначальная версия стандарта IEEE 802.11 была утверждена 26 июня 1997 г. [2]. С момента своего появления стандарт уже прошел 28-летний путь эволюционного развития, и сейчас множество рабочих групп IEEE активно работают над его совершенствованием. Эволюция стандарта тесно связана с развитием различных сервисов, набор которых также развивался вместе с индустрией телекоммуникаций.

28 лет – это значительный срок в текущей истории беспроводных локальных сетей. Для сравнения можно упомянуть технологию IEEE 802.16 (WiMAX), которая появилась в декабре 2001 г., но практически исчезла из-за развития сотовых сетей LTE. С другой стороны, можно отметить стек технологий IEEE 802.15 Bluetooth, который активно развивается с момента выхода на рынок в 1999 г. (рисунок 1).

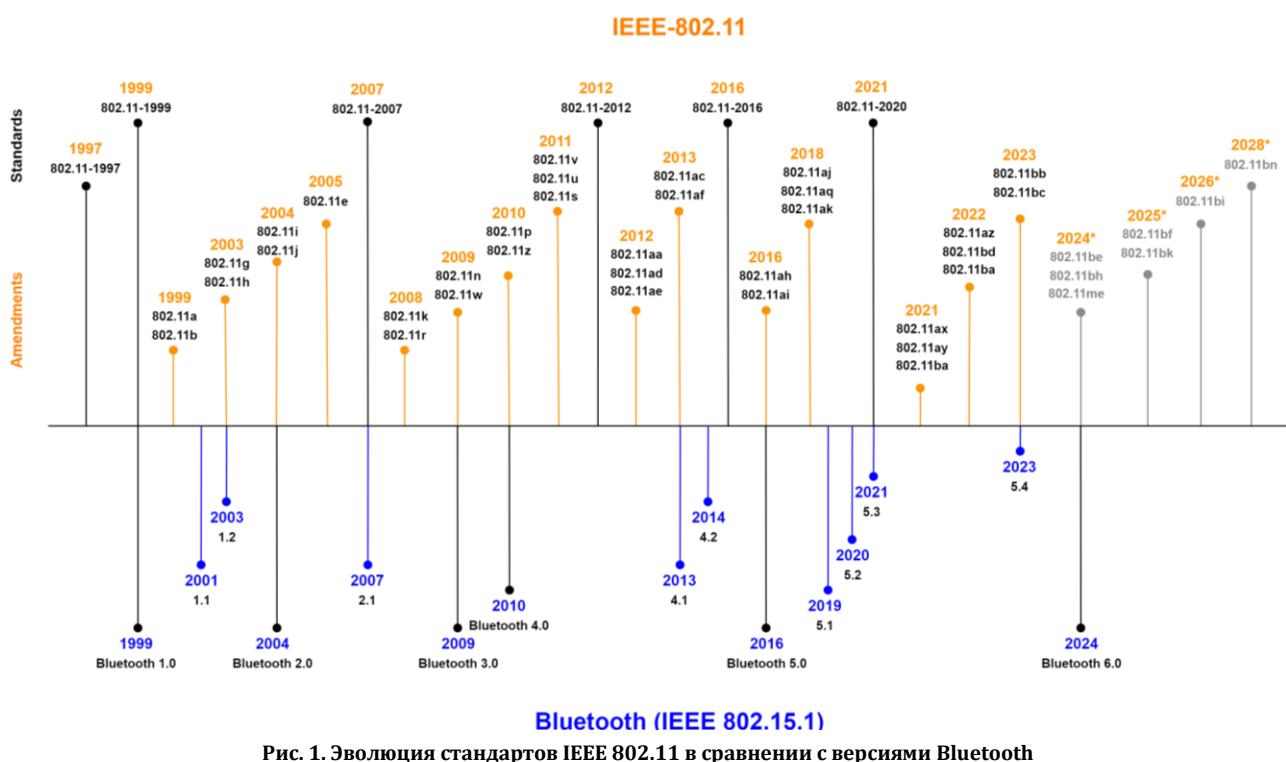


Рис. 1. Эволюция стандартов IEEE 802.11 в сравнении с версиями Bluetooth

Fig. 1. Evolution of IEEE 802.11 Standards in Comparison with Bluetooth Versions

Обе упомянутые технологии беспроводного доступа имели шансы заменить Wi-Fi. Технология широкополосного доступа стандарта 802.16 в момент своего появления потенциально закрывала «пробел» между существовавшими на тот момент низкоскоростными сотовыми сетями передачи данных, предоставляемыми высокую мобильность

пользователей, и уже существовавшими тогда сетями Wi-Fi, где скорости передачи были выше, а мобильность пользователей наоборот – ниже. В то же время IEEE 802.15 занял прочную нишу в M2M-сегменте беспроводных решений.

Аналогичные параллели можно провести и с другими технологиями беспроводного доступа, перечисленными выше, что показывает в некоторой степени родственность путей развития беспроводных технологий радиодоступа. Однако в данной работе предлагается сфокусироваться на цикличности технологической эволюции стандарта IEEE 802.11.

2. Эволюция IEEE 802.11 до ЕНТ

Давно подмечено, что эволюция, как правило, имеет спиралевидную траекторию. При этом попытки реализации некоторых парадигм могут иметь место на разных уровнях развития. Так, подходы, которые производители оборудования безуспешно пытались внедрить 10–15 лет назад и которые по разным причинам не имели успеха на рынке, могут быть положительно восприняты рынком в наше время. Возможных причин тому может быть много – от более доступных вычислительных ресурсов до востребованности функционала с точки зрения конечных приложений и бизнес-требований. С. Лем в философском трактате «Сумма технологий» провел параллель между эволюцией биологических видов и аналогичным развитием технологий [3]. Авторы данного исследования соглашаются с таким сравнением и далее будут неоднократно ссылаться на эту идею. Так, например, попытку обсудить эволюционную или революционную природу дополнений IEEE 802.11 предприняли ученые из Fluke Corporation (<https://sti.eduscol.education.fr/sites/sti.eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/5868/5868-livre-blanc-airmagnet-norme-802.11ac.pdf>), рассматривая дополнение стандарта IEEE 802.11ac вскоре после его окончательного принятия [4].

Говоря о ресурсах канала стандарта IEEE 802.11, можно с некоторой долей условности выделить три основных типа ресурсов: спектральный, временный и энергетический (мощностной). Под спектральным ресурсом обычно понимаются доступные частотные диапазоны и соответствующие номера каналов, которые можно использовать при частотном планировании распределенных БЛВС. Временный ресурс можно интерпретировать как необходимость временного разделения передач различных видов трафика (в том числе трафик управления) различными клиентскими устройствами (КУ), так и – обеспечения требуемых разнородных временных интервалов между передачами. Так, к временному ресурсу в основном относится работа уровня MAC (аббр. от англ. Medium Access Control), которая распределяет доступное время канала между клиентскими устройствами, обеспечивая множественный доступ (CSMA / CA). Также к временному ресурсу можно с некоторыми оговорками отнести рост скоростей модуляции, обеспечиваемый последовательным расширением списка

MCS. Наконец, энергетический (или мощностной) ресурс позволяет КУ получать сигнал с достаточным уровнем принимаемой мощности, чтобы обеспечить необходимое соотношение сигнал / шум (SNR, аббр. от англ. Signal-to-Noise Ratio) для работы на требуемой схеме модуляции и кодирования (MCS, аббр. от англ. Modulation and Coding Scheme). Здесь должны быть учтены разнообразные характеристики процессов приема, передачи и распространения сигнала, такие как коэффициенты усиления антенн, ослабление сигнала в среде и многие другие.

Необходимо сказать, что до дополнения IEEE 802.11be (ЕНТ) в стандарт в целом было внесено множество важных технологических улучшений. А все изменения в рамках трех обозначенных типов ресурсов теперь заметны в нескольких ключевых областях: скорости передачи данных, особенностях использования спектра, возможных однопользовательских и многопользовательских режимах, а также механизмах MAC. Далее представлен краткий обзор этих улучшений.

2.1. Повышение скоростей передачи данных

Основным способом более эффективно использовать временный ресурс канала является рост канальной скорости передачи данных (скорости кодирования согласно MCS). Эволюция скоростей MCS с развитием стандарта отражает значительные достижения в технике модуляции и, как следствие, общих сетевых возможностях. Первоначальная реализация [1] использовала модуляцию DSSS для передачи данных с двумя скоростями: 1 и 2 Мбит/с, но с тех пор и до момента появления IEEE 802.11ax и 802.11be значения возможных скоростей передачи имели практически экспоненциальный рост (рисунок 2). Примечательно, что темпы роста скоростей Wi-Fi во многом коррелируют с эмпирическим законом Нильсена, согласно которому пропускная способность пользовательских каналов увеличивается примерно на 50 % ежегодно. Сопоставление реальных значений с прогнозируемыми по закону Нильсена показывает, что до 2013 г. скорости в Wi-Fi опережали прогнозы. В то же время общая динамика позволяет с определенной долей уверенности экстраполировать тренд на последующие годы.

Начиная с IEEE 802.11a, стандарт в рамках OFDM использует квадратурно-амплитудную модуляцию (QAM, аббр. от англ. Quadrature Amplitude Modulation) от BPSK и QPSK до 4096-QAM, при которой передается 12 бит на символ на каждой поднесущей. Кроме того, благодаря внедрению MIMO (аббр. от англ. Multiple-Input and Multiple-Output) стало возможным применить несколько пространственно-временных потоков (STS, аббр. от англ. Space-Time Stream), что дополнительно потенциально повысило скорости передачи данных.

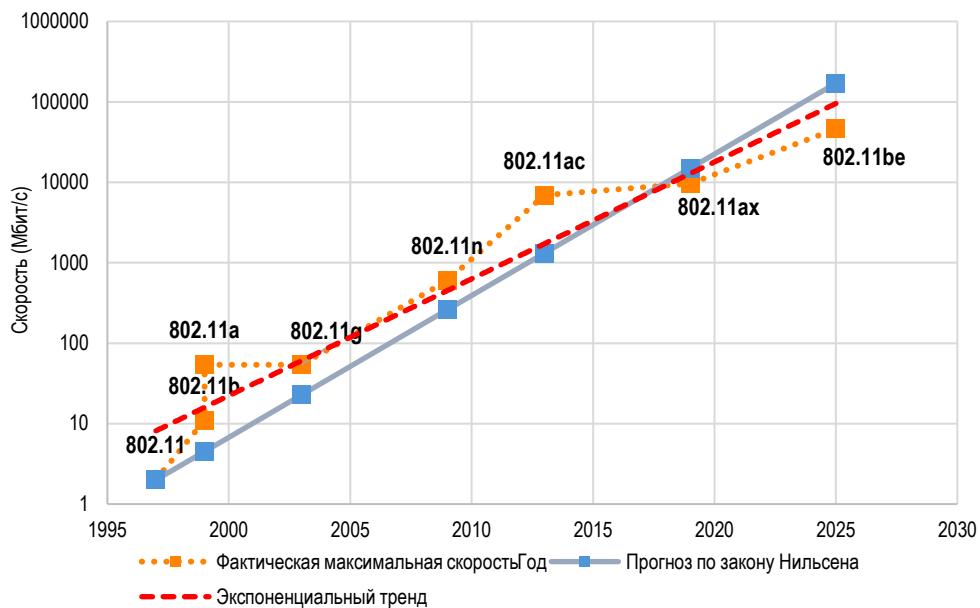


Рис. 2. Рост скоростей передачи IEEE 802.11 за время развития стандарта

Fig. 2. Growth of IEEE 802.11 Data Transfer Rates Over the Course of Standard Development

Если на ранних этапах стандарта допускался только один пространственно-временной поток, то современные реализации могут обрабатывать до 8 потоков. Необходимо отметить, что поддержка числа STS большего, чем 4, все еще остается достаточно затратным функционалом, а потому редко встречающимся среди КУ. Ширина и плотность расположения поднесущих в рамках спектральной маски канала также имели должное развитие с соответствующим повышением канальной скорости.

2.2. Развитие использования спектра и управление мощностью

Эволюция возможностей использования спектрального ресурса – это важнейший аспект [5] развития стандарта. Прогресс в этой области сыграл ключевую роль в удовлетворении растущих требований к числу устройств и скоростям передачи данных. Изначально [1] сети Wi-Fi допускали работу только в нелицензируемом диапазоне ISM (2,4 ГГц), который был доступен с конца 80-х гг. для нужд медицины, промышленности и науки, но использование этого диапазона для потребностей сетей 802.11 было существенно ограниченным ввиду того, что было возможным применить только три канала шириной 20 МГц, доступных для частотного планирования распределенной сети. Как следствие, диапазон частот ISM между 2400 и 2484 МГц (регулируется решением ГКРЧ № 15-35-09-1 от 16 октября 2015 г.) быстро стал переполненным с ростом числа самых различных устройств, что приводит к росту негативных эффектов разнородных помех и соответствующему снижению производительности.

Последовательное введение в стандарт поддиапазонов UNII-1 (5150–5250 МГц), UNII-2 (5250–5350 МГц), UNII-2ext (5490–5730 МГц) и UNII-3 (5730–5855 МГц) спектра частот 5 ГГц предоставило больше каналов. Сравнительно недавнее введение диапазона 6 ГГц стало важной вехой, добавившей ресурс поддиапазонов UNII-5,6,7,8 (5925–7115 МГц).

Еще одним фактором является возможная ширина канала. Она последовательно менялась от каналов шириной 20 МГц (802.11a/g) до 40 МГц (802.11n) и до 80 и 160 МГц (802.11ac/ax). Пропорционально растет и теоретически достижимая канальная скорость передачи, что отражено выше на рисунке 2. Также от этого зависит выбор частотного плана, как аспект использования спектрального ресурса.

Необходимо также отметить разнообразные дополнения, которые предлагают использование иных диапазонов спектра с отличными от IEEE 802.11a/g/n/ac/ax спектральными масками каналов. Так, дополнение IEEE 802.11af регламентирует работу в «телеизионном» диапазоне 54–790 МГц, а в близком ему IEEE 802.11ah работа идет на нелицензируемых частотах субгигагерцового диапазона – 900 МГц. Дополнение IEEE 802.11u предполагало работу режимов IEEE 802.11n (НТ) на лицензируемых частотах 3650–3700 МГц. Миллиметровый диапазон 57–71 ГГц (57–66 ГГц в РФ) используется дополнениями IEEE 802.11ad и 802.11ay (WiGig). Ближний инфракрасный диапазон с длинами волн 800–1000 нм используется дополнением IEEE 802.11bb (Li-Fi). Кроме того, существует достаточно много разнородных проприетарных разработок,

которые основываются на стандартах описывающего семейства и решают достаточно узкоспециализированные задачи^{1,2}.

В рамках управления спектральным ресурсом существует механизм балансировки КУ между диапазонами (band steering), который имеет целью обеспечивать подключение двухдиапазонных КУ в диапазон 5 ГГц, таким образом повышая производительность всей сети в целом. Развитием этого подхода стало дополнение стандарта IEEE 802.11v, нацеленное улучшить процесс перехода КУ между точками доступа (ТД), при котором клиенту сообщается о рекомендованных ТД для дальнейшей работы.

Во всех случаях доступный для частотного планирования набор каналов и возможные мощности излучения определяются конкретным регуляторным доменом, которые были введены в дополнении IEEE 802.11d. С точки зрения допустимой мощности излучения одним из важнейших дополнений является IEEE 802.11h-2003, в рамках которого были регламентированы механизмы управления мощностью излучения TPC (аббр. от англ. Transmit Power Control) и DFS (аббр. от англ. Dynamic Frequency Selection). Последний нацелен на минимизацию создаваемых помех в диапазоне 5 ГГц для систем навигации, однако этот механизм в РФ не имеет существенного значения, поскольку реализация уличного покрытия в этих частотах требует согласования у регулятора.

BSS (аббр. от англ. Basic Service Set) Coloring – это еще одна важная функция, введенная в дополнении 802.11ax. Она потенциально снижает помехи между перекрывающимися сетями, присваивая различные цветовые коды соседним BSS, что помогает минимизировать вероятность коллизии и улучшает производительность в некоторых условиях работы.

2.3. Эволюция многопользовательских режимов

Первоначальные реализации стандарта до дополнения IEEE 802.11n включительно предусматривали одновременное взаимодействие только двух устройств (ТД и КУ) в канале, ввиду факта разделенности среды передачи. Тем не менее, было очевидно, что более эффективно использовать временной ресурс канала также можно путем одновременной работы нескольких пользователей. Поэтому с момента своего появления стандарт IEEE 802.11 претерпел существенные улучшения в поддержке одновременной многопользовательской работы. Первым шагом был механизм многопользовательского MIMO (MU-MIMO), впервые представленный в IEEE 802.11ac (в так называемой «второй волне» – wave 2), который

для исходящего трафика использовал технологию «формирования луча» Transmit Beamforming (TxBF).

Ортогональное частотное разделение с множественным доступом (OFDMA, аббр. от англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access), введенное в 802.11ax, делит канал на группы поднесущих (или иначе на ресурсные блоки, далее – RU, аббр. от англ. Resource Units,), что позволяет нескольким пользователям одновременно принимать и передавать данные. Это позволяет существенно увеличить пропускную способность ячейки сети. Этот подход в ЕНТ получил дальнейшее развитие.

Уровень MAC стандарта IEEE 802.11 развивался от начального механизма CSMA / CA с одноранговыми сетями до разнообразных сложных инфраструктур. Введение понятия о качестве обслуживания (QoS, аббр. от англ. Quality of Service) в дополнении IEEE 802.11e позволило приоритизировать данные с учетом их чувствительности к задержке, обеспечивая более плавную работу и меньшую задержку для таких приложений.

2.4. Эволюция подходов к безопасности

Развитие подходов к безопасности в рамках IEEE 802.11 последовательно отвечало растущим требованиям обеспечения конфиденциальности беспроводной связи. С ростом распространенности и значимости беспроводных сетей необходимость в надежных мерах безопасности увеличилась, чтобы противостоять растущим угрозам кибератак, утечек данных и несанкционированного доступа. Далее рассмотрим, как эти протоколы безопасности развивались с течением времени.

Исторически первым протоколом был Wired Equivalent Privacy (WEP), представленный в 1997 г. WEP стремился обеспечить конфиденциальность данных, сравнимую с проводными сетями, используя потоковый алгоритм RC4 для шифрования. Однако вскоре выяснилась уязвимость алгоритма шифрования и методов управления ключами, которая позволяла злоумышленникам легко взламывать ключи WEP. В результате достаточно быстро WEP был признан устаревшим. Чтобы устранить уязвимости WEP, в 2003 г. был представлен стандарт WPA (аббр. от англ. Wi-Fi Protected Access), который использовал протокол TKIP (аббр. от англ. Temporal Key Integrity Protocol) для динамической генерации ключей и предлагал усовершенствованные методы аутентификации, включая PSK (аббр. от англ. Pre-Shared Key) для домашних сетей и протокол EAP (аббр. от англ. Extensible Authentication Protocol) для корпоративных.

¹ BreezeAIR – «Точка-Точка». URL: <https://telrad.com/wp-content/uploads/2020/05/%D0%9E%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%BA-B5-BreezeAIR-%D0%A0%D0%A0%D0%9B-v1.pdf> (Accessed 19.11.2025)

² 5 GHz PMP 450m Access Point. URL: https://brandcentral.cambiumnetworks.com/m/78445047c05bf04b/original/Cambium_Networks_data_sheet_5GHz_PMP_450m.pdf (Accessed 19.11.2025)

Стандарт IEEE 802.11w [6], принятый в 2009 г., усилил защиту управляющих кадров, ранее уязвимых для атак (например, деаутентификации). Он предотвращает вмешательство в работу сети, блокируя попытки злоумышленников выдавать себя за легитимные устройства и отправлять вредоносные команды управления.

В рамках стандарта WPA поддерживаются различные типы EAP, соответствующие разным требованиям безопасности. Их краткая характеристика представлена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Типы EAP и их актуальность

TABLE 1. EAP Types and Their Relevance

Тип EAP	Описание	Статус
EAP-TLS	Использует сертификаты для взаимной аутентификации, требует управления сертификатами	Актуален
EAP-TTLS	Требует серверный сертификат, аутентификация клиента через защищенный туннель	Актуален
EAP-PEAP	Аналогичен EAP-TTLS, но с дополнительной защитой учетных данных внутри туннеля TLS	Актуален
EAP-SIM	Аутентификация с использованием SIM-карт, применяется в мобильных сетях	Актуален
EAP-FAST	Использует защищенные данные (PAC) для аутентификации без сертификатов	Актуален
LEAP (Lightweight EAP)	Метод Cisco, признан небезопасным	Устаревший
EAP-MD5	Аутентификация по паролю, уязвим к атакам перебора	Устаревший

В 2018 г. Wi-Fi Alliance представил стандарт WPA3, призванный устранить уязвимости, присущие предыдущим поколениям, и повысить общий уровень защиты беспроводных сетей (<https://www.wi-fi.org/file/wpa3-specification>). Одним из ключевых нововведений стало внедрение протокола SAE (аббр. от англ. Simultaneous Authentication of Equals), заменившего PSK и обеспечивающего устойчивость к атакам перебора благодаря использованию более надежного обмена ключами на основе криптографии Диффи – Хеллмана. WPA3 также реализует механизм, благодаря которому даже при компрометации долгосрочного ключа злоумышленник не сможет расшифровать данные прошлых сеансов. Также стандарт включает технологии, упрощающие безопасную настройку и подключение устройств с ограниченными ресурсами, что особенно актуально для IoT.

2.5. Эволюция механизмов «мобильности» устройств

С развитием стандартов Wi-Fi все большее значение приобретает мобильность КУ – их способность быстро и незаметно для пользователя переключаться между ТД без потери соединения. Такие переходы называются по-разному в зависимости от контекста: handover – когда клиент перемещается между точками доступа внутри одной сети (ESS), и roaming – когда переход происходит между различными сетями или контроллерами. На практике чаще встречается именно handover, так как большинство Wi-Fi-сетей построены централизованно и управляются единым контроллером.

До появления стандарта 802.11g, призванного ускорить процесс переключения между точками, производители реализовывали собственные решения, среди которых наиболее известен механизм ОКС (аббр. от англ. Opportunistic Key Caching). Он позволял повторно использовать ключи безопасности при подключении к другим точкам в пределах одной сети, сокращая задержки при переходе (https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/9800/17-2/config-guide/b_wl_17_2_cg/opportunistic_key_caching.pdf).

Развитие стандартов продолжилось с появлением дополнений IEEE 802.11, направленных на повышение мобильности КУ:

1) 802.11k (Radio Recourse Management) позволяет точкам доступа предоставлять КУ информацию о соседних точках [7];

2) 802.11r (Fast BSS Transition) обеспечивает быстрое и безопасное переключение между точками доступа одной БЛС; позволяет предварительно устанавливать ключи безопасности, что значительно сокращает время переключения и дает возможность пользователю перемещаться по сети без заметных прерываний в соединении [8];

3) 802.11v (Wireless Network Management) позволяет точкам доступа передавать КУ информацию о состоянии сети, что помогает устройствам принимать решения о переключении на другую точку доступа для оптимизации соединения [9].

Важно понимать, что даже при наличии всех технических возможностей для быстрого перехода (handover), таких как поддержка 802.11k, 802.11r и 802.11v, корректно настроенная инфраструктура и наилучшие параметры сети – окончательное решение о переходе всегда остается за клиентом. Устройство самостоятельно анализирует множество факторов, таких как уровень сигнала, качество канала, параметры безопасности и так далее.

3. Обзор текущего состояния стандарта IEEE 802.11 и рабочих групп

На декабрь 2025 г. актуальными являются следующие документы, разработанные рабочими группами IEEE 802.11 (https://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm):

- IEEE 802.11-2024 – основное тело стандарта с последними дополнениями;
- IEEE 802.11ax – High Efficiency WLAN (так называемый Wi-Fi 6);
- IEEE 802.11ay – Next Generation 60 GHz (технология следующего поколения для диапазона 60 ГГц);
- IEEE 802.11az – Next Generation Positioning (технология позиционирования следующего поколения);
- IEEE 802.11ba – Wake Up Radio;
- IEEE 802.11bb – Li-Fi;
- IEEE 802.11bc – Enhanced Broadcast Service (расширение широковещательных услуг);
- IEEE 802.11bd – Enhancements for Next Generation V2X (улучшения для следующего поколения V2X (Vehicle-to-Everything));
- IEEE 802.11be – Extremely High Throughput (так называемый Wi-Fi 7);
- IEEE 802.11bf – WLAN Sensing;
- IEEE 802.11bh – Randomized and Changing MAC Addresses (рандомизация и изменение MAC-адресов);
- IEEE 802.11bk – 320 MHz Positioning (позиционирование на частоте 320 МГц).

Отметим, что ранее ожидалось, что дополнение стандарта IEEE 802.11be будет завершено к концу 2024 г., при этом решения на его основе присутствовали на рынке и ранее. Кроме того, несколько документов других рабочих групп находятся на различных стадиях разработки:

- IEEE 802.11bi – Enhanced Data Privacy (улучшенная конфиденциальность данных);
- IEEE 802.11bn – Ultra High Reliability (так называемый Wi-Fi 8);
- IEEE 802.11bp – Ambient Power Communication (связь с использованием окружающей энергии);
- IEEE 802.11bq – Integrated Millimeter Wave (связь в диапазоне 45-70 ГГц);
- IEEE 802.11br – Enhanced Light Communication (связь с использованием света);
- IEEE 802.11bt – Post Quantum Cryptography (пост-квантовая криптография).

Следующее крупное обновление основного тела стандарта ожидается ориентировочно в 2028 г. в рамках работы рабочей группы IEEE 802.11mf – Accumulated Maintenance Changes.

Далее мы рассмотрим ожидаемое в будущем дополнение UHR с учетом текущего состояния стандарта (НЕ и ЕНТ).

4. Укрупненный анализ развития стандарта с точки зрения цикла «эволюция / революция»

Развитие стандарта IEEE 802.11 представляет собой циклический процесс, где каждый этап сочетает элементы «революции» и «эволюции». Жизненный цикл дополнений стандарта IEEE 802.11 составляет около 5 лет, и на каждом этапе появляются новые функциональные возможности, внедряются новые технологии и улучшаются имеющиеся.

Стандарт 802.11-1997/802.11b-1999 можно рассматривать как исходную отправную точку развития. Появившееся в 1999 г. дополнение 802.11a было, в некотором смысле, революционным, так как в его рамках был предложен новый частотный диапазон, QAM-модуляция и OFDM. Следующее дополнение 802.11g в большей степени можно характеризовать как эволюционное, так как оно объединяло скоростные преимущества 802.11a с распространенностью диапазона 2,4 ГГц.

Появление технологий MIMO, агрегирования каналов и TxBF в дополнении 802.11n имело преимущественно революционный характер с точки зрения организации механизмов взаимодействия КУ с БЛВС. В то же время дополнение 802.11ac было скорее эволюционным развитием, внося поддержку большего числа пространственных потоков, большей возможной ширины частотного канала, а также развития MU-MIMO. Дополнение 802.11ax напротив – внося улучшения в части OFDMA, одновременной работы в двух частотных диапазонах, а также другие нововведения канального и физического уровня, – снова вносило революционный характер.

Наконец последнее в настоящий момент дополнение 802.11be также имеет эволюционный характер ввиду развития и улучшения нововведений, сделанных на предыдущем этапе. От разрабатываемого к 2028 г. дополнения 802.11bn отрасль ожидает революционных изменений, в основе которых лежат совместная работа нескольких точек доступа и глубокая переработка механизмов кодирования.

Процесс эволюции стандартов IEEE 802.11 требует баланса между внедрением новых технологий и поддержанием совместимости с существующими системами. Это включает в себя решения сложных технических задач, таких как моделирование, проектирование и тестирование. Неудачное внедрение стандарта 802.11a показало, что рынок не был готов к высокой стоимости оборудования [10], а потребители не увидели достаточно преимуществ от нового стандарта. Этот опыт подчеркивает важность оценки потребностей рынка и готовности инфраструктуры к новым технологиям.

5. Выводы

Подытоживая вышесказанное, необходимо отметить, что, во-первых, IEEE 802.11 – это зрелый стандарт с длительной историей, который прошел значительный путь развития и продолжает эволюционировать в ответ на растущие требования в области скорости, эффективности и функциональности. Его популярность не вызывает сомнений, и ретроспективный анализ всех этапов его развития интересен как для решения актуальных задач, так и для прогнозирования будущих изменений в технологии.

Во-вторых, технология Wi-Fi прошла долгий путь эволюции, начиная с низких скоростей передачи только в рамках ISM-диапазона и вплоть до современных многофункциональных режимов с поддержкой многих диапазонов, подходов и архитектур.

В-третьих, темпы роста стандартизованных предельных скоростей передачи в сетях Wi-Fi во многом коррелируют с эмпирическим законом

Нильсена, согласно которому пропускная способность пользовательских каналов увеличивается примерно на 50 % ежегодно. Эта тенденция наблюдается в течении последних 25 лет, и мы не видим оснований к отказу от нее.

В-четвертых, эволюция стандарта демонстрирует цикличность, где каждый новый этап поочередно представляет собой либо революционные изменения, либо усовершенствование уже существующих технологий, что оказывает существенное влияние на проектирование и функциональность сетей.

В-пятых, в работе продемонстрированы вехи четвертьвековой эволюции технологии Wi-Fi от ранних версий до ключевых современных нововведений, которые ожидает отрасль.

Важной научной задачей остается обеспечение обратной совместимости с предыдущими версиями стандартов. Это требует разработки решений, которые позволят старым и новым устройствам работать в единой сети, сохраняя при этом качество связи.

Список источников

1. 802.11-1997 – IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. DOI:10.1109/IEEESTD.1997.85951
2. 802.11-2020 – IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
3. Лем С. Сумма технологий. М.: Мир, 1964.
4. IEEE 802.11ac-2013 – IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. DOI:10.1109/IEEESTD.2013.7797535
5. Vikulov A., Paramonov A., Tatarnikova T. Geometrical Approach to the Plane Tessellation in the IEEE 802.11 Networks Channel Planning // Proceedings of the 21st International Conference (NEW2AN 2021), and 14th Conference (ruSMART 2021), St. Petersburg, Russia, 26–27 August 2021. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2022. Vol. 13158. PP. 449–469. DOI:10.1007/978-3-030-97777-1_38. EDN:GLRQL
6. 802.11w-2009 – IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 4: Protected Management Frames. DOI:10.1109/IEEESTD.2009.5278657
7. 802.11k-2008 – IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 1: Radio Resource Measurement of Wireless LANs. DOI:10.1109/IEEESTD.2008.4544755
8. 802.11r-2008 – IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 2: Fast Basic Service Set (BSS) Transition. DOI:10.1109/IEEESTD.2008.4573292
9. 802.11v-2011 – IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 8: IEEE 802.11 Wireless Network Management. DOI:10.1109/IEEESTD.2011.5716530
10. Gain B. 802.11a liftoff delayed by cost and other problems // EE Times. 2002. URL: <https://www.eetimes.com/802-11a-liftoff-delayed-by-cost-and-other-problems> (Accessed 13.05.2025)

References

1. 802.11-1997 – IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. DOI:10.1109/IEEESTD.1997.85951
2. 802.11-2020 – IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.

3. Lem S. *Summa Technologiae*. Kraków: Wydawnictwo Literackie, 1964.
4. 802.11ac-2013 – IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz. DOI:10.1109/IEEESTD.2013.7797535
5. Vikulov A., Paramonov A., Tatarnikova T. Geometrical Approach to the Plane Tessellation in the IEEE 802.11 Networks Channel Planning. *Proceedings of the 21st International Conference, NEW2AN 2021, and 14th Conference, ruSMART 2021, St. Petersburg, Russia, 26–27 August 2021. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol.13158. Cham: Springer; 2022. p.449–469. DOI:10.1007/978-3-030-97777-1_38. EDN:GLRRQL
6. 802.11w-2009 – IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 4: Protected Management Frames. DOI:10.1109/IEEESTD.2009.5278657
7. 802.11k-2008 – IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications. Amendment 1: Radio Resource Measurement of Wireless LANs. DOI:10.1109/IEEESTD.2008.4544755
8. 802.11r-2008 – IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications. Amendment 2: Fast Basic Service Set (BSS) Transition. DOI:10.1109/IEEESTD.2008.4573292
9. 802.11v-2011 – IEEE Standard for Information Technology – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications. Amendment 8: IEEE 802.11 Wireless Network Management. DOI:10.1109/IEEESTD.2011.5716530
10. Gain B. 802.11a liftoff delayed by cost and other problems. *EE Times*. 2002. URL: <https://www.eetimes.com/802-11a-liftoff-delayed-by-cost-and-other-problems> [Accessed 13 May 2025]

Статья поступила в редакцию 22.05.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 13.11.2025.

The article was submitted 22.05.2025; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 13.11.2025.

Информация об авторах:

СКОРОБОГАТОВА Светлана Алексеевна	аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  https://orcid.org/0009-0000-1013-617X
ВИКУЛОВ Антон Сергеевич	кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  https://orcid.org/0000-0002-6671-9267
ПАРАМОНОВ Александр Иванович	доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  https://orcid.org/0000-0002-4104-3504

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.