

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-37>

УДК 004

ТАБОР Денис

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
<https://orcid.org/0009-0002-6813-2125>

## ОЦІНКА КЛЮЧОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ WI-FI 7 ПОКОЛІННЯ

Стандарт IEEE 802.11be був специфікований робочою групою на початку 2024 і став вдосконаленою версією попереднього стандарту 802.11ax. Остання версія стандарту відкриває нове покоління технології WI-FI 7, що також має назву *Extremely High Throughput (EHT)* і обіцяє новий рівень якості роботи безпроводної мережі.

Головні відмінності і особливості стандарту 802.11be є максимальна швидкість передачі даних до 46 Гбіт/с, робота окремо або одразу у 3 діапазонах частот 2.4, 5, 6 ГГц з функцією *Multi-link Operation (MLO)*, смуга пропускання шириною 320 МГц, новий тип квадратурної модуляції 4K-QAM, можливість використання технології MU-MIMO розмірністю 16x16, використання нового формату ресурсної одиниці спектрального ресурсу (MRU) що дозволить ефективно використовувати канал при роботі великої кількості пристроїв, обмежений цільовий час пробудження (RTWT) покращена функція що керує часом пробудження пристроїв для передачі інформації.

Ці покращення відкривають широкі перспективи для використання Wi-Fi 7 у різних сферах. Насамперед, це розширення можливостей для високошвидкісного домашнього Інтернету, де збільшена пропускна спроможність дозволить підтримувати безліч пристроїв одночасно. Технологія також забезпечить більш надійне з'єднання для вимогливих додатків, таких як онлайн-ігри, віртуальна та доповнена реальність (VR/AR), та потокове відео з роздільною здатністю 8K. На корпоративному рівні Wi-Fi 7 здатний значно покращити продуктивність мереж в офісах, на виробничих майданчиках та розумних містах. Впровадження даної технології в медичній сфері дозволить використовувати безпроводні пристрої, які раніше були обмежені із-за недоліків бездротових технологій. Висока щільність з'єднань та мінімальні затримки роблять цю технологію особливо цінною для Інтернету речей (IoT), систем автоматизації та сенсорних мереж.

У той же час перспективи впровадження Wi-Fi 7 залежатимуть від економічної доступності обладнання, сумісності з існуючими стандартами та рівня обізнаності користувачів щодо переваг нової технології. Технологія відкриває нові можливості у автомобільній галузі, де стандарт Wi-Fi 7 дозволяє забезпечити стабільну комунікацію між автомобілями, інфраструктурою та хмарними сервісами, що сприяє підвищенню безпеки, комфорту та ефективності транспортних систем.

Очікується, що Wi-Fi 7 стане ключовим драйвером цифровізації у найближчі роки, забезпечуючи безшовний зв'язок та новий рівень взаємодії між пристроями. В даній статті більш докладно описані можливості нового стандарту безпроводної мережі 802.11be та проведена їх оцінка в перспективі використання даної технології у різних сферах.

Ключові слова: мережі Wi-Fi 7, стандарт 802.11be, MLO, квадратурна модуляція 4K-QAM, RTWT, MU-MIMO, ресурсна одиниця MRU.

TABOR Denis

State University of Information and Communication Technology

## ASSESSMENT OF THE KEY CAPABILITIES OF THE 7th GENERATION Wi-Fi WIRELESS NETWORK

The IEEE 802.11be standard, specified by a working group in early 2024, is an improved version of the previous 802.11ax standard. This latest iteration introduces a new generation of Wi-Fi 7 technology, also known as *Extremely High Throughput (EHT)*, promising unprecedented wireless network performance.

Key features and advancements of the 802.11be standard include a maximum data transfer rate of up to 46 Gbps, operation in three frequency bands (2.4 GHz, 5 GHz, and 6 GHz) either separately or simultaneously with the *Multi-Link Operation (MLO)* function, a bandwidth of 320 MHz, a new quadrature amplitude modulation scheme (4K-QAM), and support for MU-MIMO technology with a 16x16 configuration. Additionally, the standard introduces a new format for spectral resource units, known as *Multi-Resource Units (MRUs)*, enabling efficient channel utilization for a large number of devices. It also features an enhanced *Restricted Target Wake Time (RTWT)* function, which optimizes device wake-up times for data transmission.

These improvements offer significant prospects for the adoption of Wi-Fi 7 across various domains. For instance, the technology enhances high-speed home internet by providing increased bandwidth to support multiple devices simultaneously. It also ensures more reliable connections for demanding applications, such as online gaming, virtual and augmented reality (VR/AR), and 8K video streaming. At the enterprise level, Wi-Fi 7 is poised to revolutionize office networks, manufacturing sites, and smart cities by improving network productivity. In the medical field, the technology enables the use of wireless devices that were previously limited by existing wireless technologies. Its high connection density and minimal latency make it particularly valuable for the *Internet of Things (IoT)*, automation systems, and sensor networks.

Moreover, Wi-Fi 7 opens up new possibilities in the automotive sector by facilitating stable communication between vehicles, infrastructure, and cloud services. This advancement enhances safety, comfort, and efficiency in transportation systems.

However, the widespread implementation of Wi-Fi 7 will depend on factors such as the economic availability of equipment, compatibility with existing standards, and user awareness of its benefits. As a key enabler of digitalization, Wi-Fi 7 is expected to drive seamless communication and foster new levels of interaction between devices in the coming years.

This article explores the capabilities of the 802.11be wireless network standard in greater detail and evaluates its potential applications across various fields.

Keywords: Wi-Fi 7 networks, 802.11be standard, MLO, quadrature modulation 4K-QAM, RTWT, MU-MIMO, resource unit MRU.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Зі зростанням кількості безпроводних пристроїв та додатків і сервісів для яких необхідна висока швидкість передачі великої кількості інформації з'являється необхідність у постійній розробці нових стандартів безпроводних мереж. Для технології Wi-Fi таким є сімейство стандартів IEEE 802.11. Його остання, на даний час, презентована версія 802.11be що була анонсована для нового покоління Wi-Fi 7. Деякі ключові особливості Wi-Fi 7 включають: максимальну швидкість передачі до 46 Гбіт/с, багатоканальний режим передачі (MLO), обмежений час пробудження (RTWT). Сукупність цих нововведень забезпечує якісну роботу для таких сервісів як доповнена і віртуальна реальність, потокове відео високої якості, критично важливі додатки. Потенційно Wi-Fi 7 може бути використаний у автомобільній промисловості для зв'язку між автомобілями (V2V) та станційними об'єктами (V2I), що буде сприяти підвищенню безпеки та кращій організації дорожнього руху. Для сфери розваг і навчання надаючи можливість реалізувати більш реалістичні симуляції. Для промислової сфери використання нового стандарту забезпечить підтримку вдосконаленої автоматизації, що буде сприяти збільшенню ефективності та продуктивності. В цілому Wi-Fi 7 є важливим етапом еволюції бездротового підключення, пропонуючи покращення швидкості передачі даних, зменшення затримки і збільшення ефективності роботи бездротових пристроїв. Потенцій вплив на широке коло сфер використання підкреслює важливість даної технології. Тому мета даної роботи полягає в поглибленому огляді технології Wi-Fi 7, його ключових особливостях та впливу на різні сфери життя.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Головною особливістю Wi-Fi 7 є підвищення максимальної швидкості передачі даних, яка як заявлено має досягати 46 Гбіт/с. Що суттєво більше порівняно з попереднім стандартом де максимальна швидкість досягає 9,6 Гбіт/с. Збільшення швидкості передачі даних досягається поєднанням використанням покращених технологій, а саме: розширених схем модуляції, ширшої смуги пропускання каналу та розширених можливостей MU-MIMO.

У Wi-Fi 7 використовується новий тип квадратурної модуляції **4096-QAM**. Хоча впровадження даної модуляції збільшує номінальну швидкість лише на 20% , порівнюючи з попередніми стандартами, при цьому непропорційно збільшуються витрати. Так як відношення сигнал/шум для використання даної модуляції має бути порядку 40 дБ і таких показників, в багатьох сценаріях, можна досягти лише з використанням направленої сигналу, коли точка доступу має багато антен і обслуговує лише одну станцію з кількома антенами. При цьому не можуть бути використані багатокористувацькі передачі. Тому використання модуляції високого порядку є виправданим.

Так як ширина каналів в діапазоні частот 2,4 та 5 ГГц вже не може задовольнити потреби по необхідній пропускній спроможності каналу, тому Wi-Fi 7 використовує діапазон 6 ГГц. Щоб використовувати даний діапазон новий стандарт підтримує **смугу пропускання каналів до 320 МГц**, що вдвічі перевищує смугу пропускання 160 МГц, доступну в Wi-Fi 6. Відповідно зі збільшенням смуги пропускання лінійно збільшується швидкість передачі, якщо відстань між приймачем і передатчиком прийнятна. Також стандарт підтримує канали 160+160 МГц, які утворені двома несуміжними каналами 160 МГц. Несуміжна полоса пропускання полегшує існування сусідніх мереж, забезпечуючи високу пропускну спроможність коли суміжний спектр недоступний. Більш того стандарт дозволяє використовувати канали 240/160+80 МГц.

Для покращення фізичного рівня нової технології внесено зміни до технології просторового мультиплексування **MU-MIMO**, а саме збільшено кількість одночасних потоків до 16x16, що дозволяє безперебійно працювати більшій кількості пристроїв, у порівнянні з попереднім стандартом.

У Wi-Fi 7 запроваджена революційна технологія **Multi-Link Operation (MLO)** [2] яка дозволяє пристроям одночасно підключатися та передавати дані через кілька частотних діапазонів або каналів. Ця функція дозволяє пристроям Wi-Fi 7 підтримувати кілька з'єднань одночасно, ефективно розподіляючи трафік даних і зменшуючи загальну затримку, схема роботи продемонстрована на рис. 1. MLO особливо корисний для чутливих до часу сервісів, таких як онлайн-ігри та зв'язок, де низька затримка має важливе значення для якісного сервісу. Використовуючи MLO, Wi-Fi 7 може значно зменшити затримку та перевантаження мережі, забезпечуючи оптимальну продуктивність навіть у середовищах із високою щільністю підключених пристроїв.

Ще одна важлива функція у Wi-Fi 7 це **обмежений цільовий час пробудження (RTWT)** - спрямована на підвищення енергоефективності пристроїв [1]. RTWT є вдосконаленням порівняно зі стандартним механізмом TWT. У традиційному TWT точки доступу (AP) і клієнтські пристрої узгоджують певний час для пробудження клієнтських пристроїв і зв'язку, таким чином зберігаючи енергію, дозволяючи пристроям залишатися в стані низького енергоспоживання, коли вони не передають або не приймають дані. RTWT вдосконалює цю концепцію, запроваджуючи більш детальний контроль і гнучкість планування. RTWT дозволяє пристроям вказувати не лише час пробудження, але й обмеження щодо цього часу. Це

означає, що пристрої можуть виходити з режиму сну через точніші проміжки часу та протягом меншого часу, що продемонстровано на рис. 2, значно знижуючи енергоспоживання та подовжуючи термін служби батареї, що має вирішальне значення для пристроїв IoT з живленням від батареї.



Рис. 1 Схема роботи технології MLO

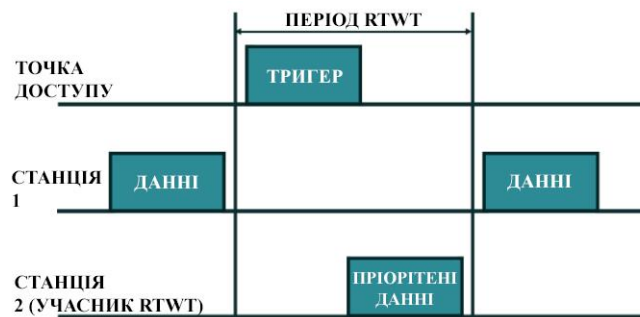


Рис. 2 Схема роботи механізму RTWT

Використання множинного доступу з ортогональним розділенням (OFDMA) [4] починаючи зі стандарту 802.11ax дозволяє розділити ресурс каналу на блоки по часу і частоті, які були названі ресурсними одиницями (RU). Це дозволяє декільком користувачів одночасне використання каналу. В залежності від полоси пропускання каналу в стандарті 802.11be RU може містити від 26 до 996, 2 x 996 та 4 x 996 тонів. Відповідно чим більша кількість RU тим вище пропускна спроможність в багатокористувацькій мережі. Однак в 802.11ax точка доступу може виділити тільки один RU для кожної станції. Що призводить до зниження пропускної здатності, особливо в сценарії з невеликою кількістю користувачів. Тому в новому стандарті підтримується призначення декількох RU для кожної станції (MRU).

Починаючи зі стандарту 802.11n для підвищення швидкості було представлено **агрегацію кадрів A-MPDU**, в якій передавач об'єднує ряд MPDU, які пройшли інкапсуляцію, та додаючи службову інформацію. Об'єднаний кадр зберігає тільки заголовок фізичного рівня що зменшує розмір кожного кадру на розмір даного заголовку. Кожне наступне покоління Wi-Fi визначала кількість кадрів MPDU які можуть бути об'єднані в A-MPDU. В стандарті 802.11be кількість збільшилась до 1024, що означає суттєве збільшення пропускної здатності.

В перспективі розвиток і впровадженні рішень на базі технології Wi-Fi 7 буде мати позитивні наслідки у різних сферах [6], особливо транспорт і медицина, завдяки підвищенню продуктивності і зниженню затримок. Завдяки підвищенню швидкості передачі даних і створенню більш надійних з'єднань цей новий стандарт підвищить рівень продуктивності в області торгівлі і промисловості. Крім того новий стандарт дозволить використовувати перспективні технології, такі як доповнена і віртуальна реальність, що дозволить створювати нові можливості в сфері розваг і навчання. Загалом можна перелічити такі можливості від розвитку Wi-Fi 7:

1. Промисловість: Wi-Fi 7 відкриває нові можливості для виробничої галузі, забезпечуючи високу швидкість передачі даних, мінімальні затримки та стабільні з'єднання, що важливо для автоматизації, робототехніки та роботи IoT-пристроїв у реальному часі. Завдяки ефективному використанню спектральних ресурсів технологія сприяє інтеграції сенсорних мереж, вдосконаленню систем моніторингу та підвищенню продуктивності підприємств [5].

2. Медицина: Wi-Fi 7 кардинально покращить якість медичних послуг. Його висока пропускна здатність та мінімальна затримка забезпечать безперебійне підключення медичних пристроїв та покращать передачу даних у режимі реального часу. Наприклад: висока швидкість дозволить хірургам віддалено керувати роботизованими системами з мінімальною затримкою, що раніше було обмежено через ненадійне підключення, пристрої для відстеження життєво важливих показників зможуть у реальному часі передавати інформацію лікарям, прискорюючи прийняття рішень.

3. Комерція: в комерційній сфері Wi-Fi 7 стане каталізатором нових форматів обслуговування та оптимізації процесів,

4. Освіта: сфера освіти отримає новий імпульс завдяки покращенню мережевої інфраструктури завдяки якій якість відео конференцій та онлайн-уроків стане значно вищою. Також навчальні заклади зможуть впроваджувати VR/AR технології для інтерактивних лекцій та лабораторних робіт.

5. Розумні пристрої: Wi-Fi 7 здатний підтримувати безліч підключень одночасно, що ідеально підходить для розумних будинків та IoT (Інтернет речей). Пристрої синхронізуються швидше, забезпечуючи безперебійну роботу систем безпеки, освітлення та побутової техніки. Впровадження технології Wi-Fi 7 може покращити системи управління містами, такі як розумні світлофори, паркувальні системи та екосистеми моніторингу.

6. Споживачі: в повсякденному житті споживачі з використанням тільки безпроводних пристроїв Wi-Fi 7 можуть переглядати фільмів у роздільній здатності 8K, онлайн-ігри та відеодзвінки стануть комфортнішими завдяки відсутності спотворень, а також підключення великої кількості пристроїв не буде викликати проблеми. При цьому пристрої зможуть споживати менше енергії завдяки використанню нововведень.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В даній роботі було проаналізовано основні можливості технології Wi-Fi 7, вивчено її ключові характеристики та потенційні застосування. Будучи революційним кроком у бездротовому з'єднанні, Wi-Fi 7 має забезпечити неперевершену швидкість, низьку затримку та ефективність мережі, змінюючи спосіб життя, роботи та розваг. Таким чином, технологія Wi-Fi 7 пропонує кілька ключових переваг порівняно з попередніми стандартами: високі швидкості передачі даних: з максимальною швидкістю передачі даних до 40 Гбіт/с Wi-Fi 7 обіцяє значно підвищити швидкість бездротових з'єднань, дозволяючи швидше завантаження, плавніше потокове відео та швидкі онлайн-ігри.

Тому впровадження Wi-Fi 7 має позитивно вплинути на різні галузі, включаючи промисловість, транспорт, медицина, міська інфраструктура, навчання, розваги, побут, покращуючи повсякденне життя та формуючи майбутнє бездротового зв'язку.

### Література

- [1] Jaswanth R. Understanding Restricted Target Wake Time (RTWT) in Wi-Fi 7 (802.11be) [Електронний ресурс] / Rajigiri Jaswanth. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-restricted-target-wake-time-rtwt-wi-fi-7-rajigiri-vz3yc/>
- [2] Jim Palmer. Wi-Fi 7 Multi-link Operations (MLO) [Електронний ресурс] / Jim Palmer. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ruckusnetworks.com/blog/2023/wi-fi-7-multi-link-operations-mlo/>
- [3] Табор Д.І. Можливості нового покоління безпроводного зв'язку wi-fi 7/ Табор Д.І. // V Всеукраїнська науково-практична конференція «Telecommunication: problems and innovation». – 2023. – С. 4–6
- [4] Lorenzo Fanari, Eneko Iradier, Iñigo Bilbao, Rufino Cabrera, Jon Montalban and Pablo Angueira / Comparison between Different Channel Coding Techniques for IEEE 802.11be within Factory Automation Scenarios // Sensors. – 2021. – 21(21).
- [5] Sallar Salam Murad, Rozin Badeel, Banan Badeel Abdal, Tasmeea Rahman, Tahsien Al-Quraishi / Mesopotamian journal of Computer Science // Mesopotamian journal of Computer Science. – 2024. – Vol.2024 –С. 128–139

### References

- [1] Jaswanth R. Understanding Restricted Target Wake Time (RTWT) in Wi-Fi 7 (802.11be) [Elektronnyi resurs] / Rajigiri Jaswanth. – 2024. – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.linkedin.com/pulse/understanding-restricted-target-wake-time-rtwt-wi-fi-7-rajigiri-vz3yc/>
- [2] Jim Palmer. Wi-Fi 7 Multi-link Operations (MLO) [Elektronnyi resurs] / Jim Palmer. – 2023. – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.ruckusnetworks.com/blog/2023/wi-fi-7-multi-link-operations-mlo/>
- [3] Tabor D.I. Mozhlivosti novoho pokolinnia bezprovodnoho zviazku wi-fi 7/ Tabor D.I. // V Vseukrainska naukovopraktychna konferentsiia «Telecommunication: problems and innovation». – 2023. – S. 4–6
- [4] Lorenzo Fanari, Eneko Iradier, Iñigo Bilbao, Rufino Cabrera, Jon Montalban and Pablo Angueira / Comparison between Different Channel Coding Techniques for IEEE 802.11be within Factory Automation Scenarios // Sensors. – 2021. – 21(21).
- [5] Sallar Salam Murad, Rozin Badeel, Banan Badeel Abdal, Tasmeea Rahman, Tahsien Al-Quraishi / Mesopotamian journal of Computer Science // Mesopotamian journal of Computer Science. – 2024. – Vol.2024 –S. 128–139