ВСТУП

Сучасний етап розвитку телекомунікацій характеризується стрімким зростанням обсягів передавання інформації, широким впровадженням мобільних пристроїв та інтенсивною цифровізацією всіх сфер діяльності людини. У таких умовах особливого значення набувають безпроводові мережі, які забезпечують гнучкий доступ до інформаційних ресурсів без необхідності використання кабельної інфраструктури. Серед різноманітних бездротових технологій саме Wi-Fi став найпоширенішим рішенням для організації доступу до мережі Інтернет у житлових, офісних, промислових і публічних середовищах.

Поширення великої кількості клієнтських пристроїв – смартфонів, планшетів, ноутбуків, мультимедійних систем, камер відеоспостереження, сенсорних вузлів IoT – суттєво збільшило навантаження на існуючі Wi-Fi мережі. Подальше ускладнення радіосередовища, зростання щільності розміщення точок доступу та збільшення рівня інтерференції призводять до зниження пропускної здатності, нестабільності сигналу, підвищення затримок та погіршення якості обслуговування (QoS). У результаті користувачі відчувають зниження швидкості доступу, погіршення якості відеозв’язку, зависання онлайн-ігор та збої у роботі критично важливих додатків.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності Wi-Fi систем у реальних умовах експлуатації. Незважаючи на постійний розвиток стандартів IEEE 802.11 та впровадження таких технологій, як OFDMA, MU-MIMO, beamforming, BSS Coloring чи TWT, значна частина бездротових мереж продовжує демонструвати продуктивність, яка істотно нижча за теоретично можливу. Це пов’язано з неправильним розгортанням інфраструктури,

помилками під час налаштування обладнання, недооцінкою впливу інтерференції, а також відсутністю комплексного підходу до оптимізації параметрів фізичного та канального рівнів.

Крім того, розвиток стандартів Wi-Fi 6/6E та Wi-Fi 7 відкрив нові можливості щодо забезпечення високої пропускної здатності й низької затримки, однак для повноцінного використання потенціалу цих технологій необхідні відповідні методи планування, аналізу й удосконалення мережевої інфраструктури. Таким чином, виникає потреба у системному дослідженні факторів, що впливають на роботу Wi-Fi мереж, а також у розробці практичних рекомендацій для підвищення їх ефективності.

Метою дипломної роботи є комплексний аналіз ефективності сучасних безпроводових Wi-Fi систем та розробка методів і рекомендацій, спрямованих на підвищення їх продуктивності, стійкості до інтерференції та якості обслуговування.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі основні завдання:

- проаналізувати теоретичні основи функціонування Wi-Fi мереж, їх архітектуру, стандарти та механізми роботи фізичного й канального рівнів;
- дослідити ключові показники ефективності Wi-Fi та фактори, що впливають на пропускну здатність, затримку, стійкість сигналу і якість передавання даних;
- оцінити вплив інтерференції, завад, щільності клієнтів та конфігурації обладнання на роботу мережі;
- проаналізувати проблеми безпеки Wi-Fi та їхній вплив на загальну продуктивність;

- розробити комплекс практичних рекомендацій щодо оптимізації Wi-Fi мереж, включаючи планування розміщення точок доступу, вибір каналів, управління потужністю, застосування сучасних стандартів 802.11ac/ax/be, а також удосконалення механізмів QoS і безпеки.

Структура роботи відповідає логіці проведеного дослідження. У першому розділі подано теоретичні основи Wi-Fi систем, зокрема архітектуру, принципи функціонування, розвиток стандартів та показники ефективності. У другому розділі проведено комплексний аналіз чинників, що визначають продуктивність мережі, включаючи пропускну здатність, затримку, інтерференцію та вплив механізмів безпеки. Третій розділ присвячений розробці методів підвищення ефективності Wi-Fi систем і містить рекомендації щодо оптимізації роботи мереж у різних сценаріях.

Таким чином, робота спрямована на визначення шляхів удосконалення Wi-Fi інфраструктури та забезпечення стабільного, масштабованого й високопродуктивного бездротового зв’язку, що є необхідною умовою для функціонування сучасних цифрових систем.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ Wi-Fi

1.1 Передумови появи та значення стандарту IEEE 802.11

Загальна характеристика безпроводових мереж стандарту IEEE 802.11

Бездротові мережі стандарту IEEE 802.11, більш відомі під комерційною назвою Wi-Fi, займають ключове місце у сучасній телекомунікаційній інфраструктурі та стали невід'ємним елементом функціонування більшості цифрових сервісів. Їхня популярність зумовлена поєднанням високої гнучкості, простоти розгортання та можливості масштабування без необхідності прокладання фізичної кабельної інфраструктури. Упродовж кількох десятиліть Wi-Fi перетворився з експериментальної технології локального зв'язку на глобальний інструмент передачі даних, який забезпечує підключення мільярдів пристроїв у приватних, корпоративних та промислових мережах.

Поява стандарту IEEE 802.11 була пов'язана з необхідністю розробки універсальної системи бездротового обміну даними на короткі відстані, яка могла б працювати в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу та забезпечувати сумісність обладнання від різних виробників. Ранні бездротові системи передачі даних базувалися на пропрієтарних рішеннях, що ускладнювало інтеграцію, масштабування та підтримку таких мереж.

IEEE визначив набір принципів, спрямованих на створення відкритого стандарту:

- побудова універсального PHY-рівня, що визначає спектр, модуляцію та параметри сигналу;
- створення MAC-рівня, який забезпечує справедливий і колізійно-стійкий доступ до середовища;
- забезпечення сумісності та взаємодії між усіма пристроями, сертифікованими за одним стандартом;

- можливість подальшого розширення, що дозволило вводити нові підстандарти без зміни базової архітектури.

Результатом стала розробка першої специфікації IEEE 802.11-1997, яка забезпечувала швидкість до 2 Мбіт/с і стала відправною точкою для стрімкого розвитку технології Wi-Fi.

Класифікація безпроводових мереж

При розгляді Wi-Fi доцільно розмістити його у загальному класифікаційному просторі бездротових технологій. Традиційно безпроводові мережі класифікуються за територіальним охопленням представлено на рис.1.1:

- WPAN (Wireless Personal Area Network) – персональні мережі короткого радіусу дії, до 10 метрів (Bluetooth, ZigBee);
- WLAN (Wireless Local Area Network) – локальні мережі радіусу до 100 метрів (Wi-Fi, 802.11);
- WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) – міські мережі (WiMAX);
- WWAN (Wireless Wide Area Network) – глобальні системи мобільного зв’язку (4G, 5G).

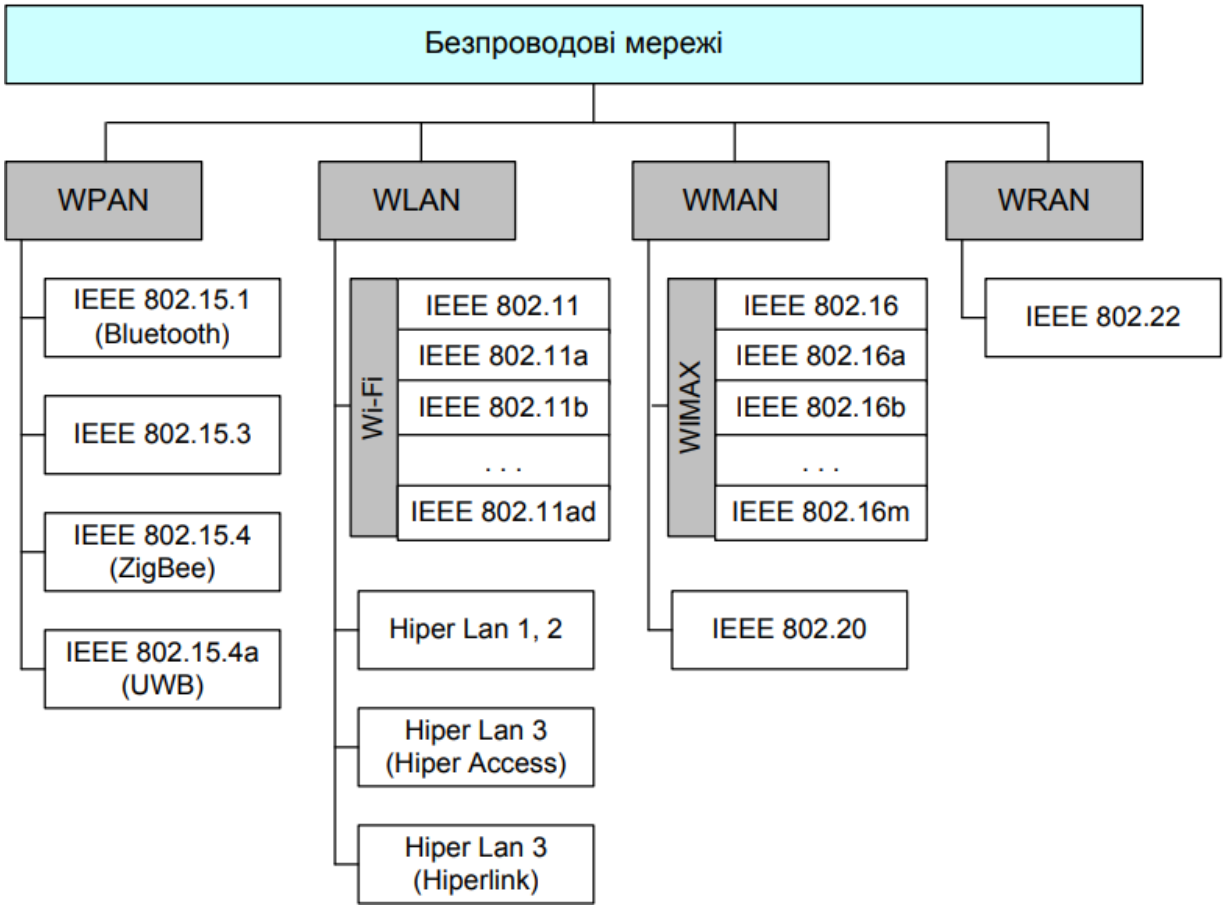


Рис. 1.1 Класифікація безпроводових комп’ютерних мереж

Системи WLAN, до яких належить Wi-Fi, орієнтовані на створення гнучких мережевих структур усередині будівель або невеликих територій. Вони дозволяють організувати доступ великої кількості пристроїв до локальних та глобальних ресурсів із високою швидкістю та відносно низькими вимогами до інфраструктури.

Основні складові Wi-Fi мережі.

Архітектура Wi-Fi охоплює кілька ключових елементів, кожен з яких виконує важливу функцію у забезпеченні бездротового зв'язку:

- Клієнтські пристрої (STA) – смартфони, ноутбуки, IoT-модулі, сенсори тощо.
- Точки доступу (Access Point, AP) – забезпечують радіодоступ, керують передаванням кадрів, виконують функції автентифікації та управління ресурсами.
- Система розподілу (Distribution System, DS) – об'єднує кілька точок доступу в єдину логічну мережу.
- Шлюзи (Gateways) – забезпечують вихід у WAN або Інтернет.
- Для опису структури використовується поняття зони обслуговування:
- BSS (Basic Service Set) – одна точка доступу та підключені клієнти;
- ESS (Extended Service Set) – кілька точок доступу, з'єднаних у спільну мережу, з підтримкою роумінгу клієнтів;
- IBSS (Independent BSS) – ad-hoc з'єднання без участі точки доступу.

Завдяки такій архітектурі Wi-Fi може масштабуватися від домашньої мережі до великих корпоративних систем з десятками точок доступу.

Характеристики радіосередовища та частотних діапазонів

Wi-Fi використовує два основні неліцензійні діапазони:

- 2.4 ГГц – ширший радіус дії, низька пропускна здатність, висока завадність;
- 5 ГГц – вища швидкість, більше каналів, менший радіус, вища чутливість до перешкод;

Сучасні стандарти (Wi-Fi 6E та Wi-Fi 7) працюють також у діапазоні:

- 6 ГГц – значно більша кількість каналів, низький рівень інтерференції, підтримка широких каналів (80–320 МГц).
- Передавання даних у Wi-Fi базується на використанні широкосмугових каналів, ширина яких змінюється залежно від стандарту: 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц, 160 МГц або 320 МГц.

Ефективність використання спектра визначається спектральною ефективністю:

$$\eta = BC \qquad (1.1)$$

де:

C – пропускна здатність каналу (біт/с),

B – ширина каналу (Гц).

З ростом ширини каналу пропускна здатність підвищується, але зменшується радіус дії через підвищені втрати сигналу.

Методи розширення спектра та особливості фізичного рівня

Початкові версії IEEE 802.11 передбачали використання трьох основних методів перенесення сигналу:

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
    - Сигнал розширюється на широкому спектрі за допомогою псевдовипадкового коду. Перевага – підвищена завадостійкість.
- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

- Сигнал постійно стрибає між частотами згідно з алгоритмом перебудови. Перевага – стійкість до вузькосмугових перешкод.

- Infrared (IR)
  - Обмежене застосування, залежить від прямої видимості.

У подальших специфікаціях ці методи були замінені більш ефективними технологіями OFDM, MIMO та OFDMA.

Актуальність розвитку стандарту IEEE 802.11.
Сучасні вимоги до Wi-Fi значно зросли:

- необхідність підтримки великої кількості пристроїв у невеликому просторі;
- вимоги до високої пропускної здатності й низької затримки;
- розвиток хмарних сервісів, відеоконференцій, потокового відео 4K/8K;
- інтеграція IoT-пристроїв з низьким енергоспоживанням.

У таких умовах класичні стандарти (802.11a/b/g) перестали відповідати вимогам часу, що зумовило появу нових поколінь Wi-Fi, орієнтованих на спектральну ефективність, багатокористувацький доступ та підвищену стійкість до перешкод.

1.2. Архітектура та принципи роботи Wi-Fi мереж

Архітектура Wi-Fi мереж побудована таким чином, щоб забезпечувати гнучку, масштабовану та універсальну платформу для бездротової передачі даних у локальних мережах різного рівня складності. Завдяки модульній структурі

стандарту IEEE 802.11 Wi-Fi може застосовуватися як у простих домашніх умовах, де обслуговується кілька користувачів, так і у складних корпоративних середовищах зі сотнями і тисячами клієнтських пристроїв. Основними компонентами архітектури є клієнтські станції, точки доступу, система розподілу, а також механізми управління доступом до середовища та координації передачі кадрів. Усі ці елементи взаємодіють між собою, формуючи цілісну систему, здатну забезпечити стабільну роботу у динамічному та перешкодженому радіосередовищі.

Базові елементи архітектури Wi-Fi мережі.

Бездротова мережа стандарту IEEE 802.11 містить кілька структурних компонентів, які формують її функціональну основу. На рис. 1.2 наведена узагальнена схема функціонування Wi-Fi мережі, яка демонструє взаємодію між основними компонентами.

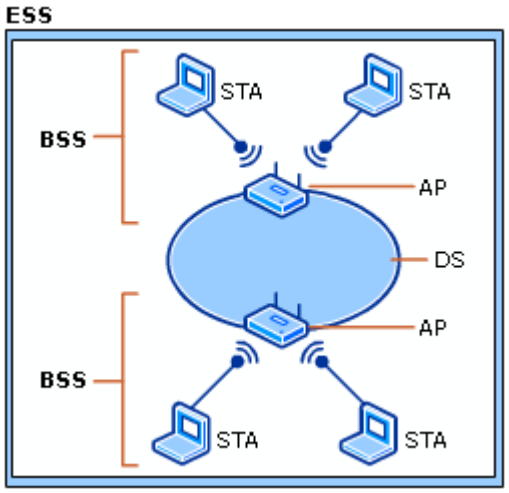


Рис. 1.2 Узагальнена архітектура функціонування Wi-Fi мережі

1. Клієнтські пристрої (STA — Station)

Клієнтом Wi-Fi називається будь-який пристрій, оснащений радіомодулем IEEE 802.11. До таких пристроїв належать ноутбуки, смартфони, планшети, телевізори, маршрутизатори, системи відеоспостереження, датчики IoT тощо. Кожна станція має унікальний MAC-адрес, що дозволяє їй брати участь в обміні кадрами на канальному рівні.

Клієнтські пристрої виконують такі функції:

- пошук доступних мереж;
- автентифікація та асоціація з точкою доступу;
- формування та прийом радіокадрів;
- участь у механізмах уникнення колізій;
- підтримка службових процесів, таких як роумінг та повторна асоціація.

2. Точки доступу (AP — Access Point)

Точка доступу є центральним елементом інфраструктурної Wi-Fi мережі. Вона забезпечує:

- ретрансляцію трафіку між клієнтами та дротовою мережею;
- управління доступом до середовища;
- координацію передачі кадрів;
- підтримку механізмів безпеки (WPA2/WPA3);
- балансування навантаження;

- контроль за використанням каналів та рівнями потужності.

Сучасні точки доступу також можуть підтримувати функції MU-MIMO та Beamforming для оптимізації сигналу.

3. Система розподілу (DS — Distribution System)

Система розподілу поєднує точки доступу між собою та забезпечує можливість створення розширених мереж (ESS — Extended Service Set). У DS можуть використовуватися різні технології передачі:

- дротова (Ethernet);
- оптоволоконна;
- бездротова (Mesh).

DS визначає логіку переміщення кадрів між різними сегментами WLAN, у тому числі підтримку роумінгу, коли клієнт переміщується між зонами покриття різних точок доступу.

4. Зони обслуговування — BSS, ESS, IBSS

BSS (Basic Service Set) - це найпростіша одиниця в структурі Wi-Fi мережі. Складається з точки доступу та підключених до неї клієнтів.

ESS (Extended Service Set) - об’єднання кількох зон BSS, що працюють з єдиним SSID. Забезпечує роумінг клієнтів між точками доступу.

IBSS (Independent Basic Service Set) - ad-hoc режим, у якому клієнти обмінюються даними напряму, без точки доступу. Такий режим використовується рідко і в основному у спеціалізованих сценаріях.

Режими функціонування Wi-Fi мереж.

Wi-Fi може працювати у кількох режимах, що визначають характер взаємодії між клієнтами та точкою доступу.

Інфраструктурний режим (Infrastructure Mode)- основний і найпоширеніший режим роботи Wi-Fi. Усі клієнти надсилають кадри виключно через точку доступу. Переваги цього режиму:

- централізоване управління;
- контроль безпеки;
- можливість інтеграції з дротовою мережею;
- підтримка масштабування.

У Ad-Hoc режимі (IBSS) клієнти утворюють децентралізовану мережу без точки доступу. Ад-Нос використовується у випадках, коли потрібно швидко організувати локальну мережу без інфраструктури. Недоліками є відсутність засобів масштабування, обмежена безпека та нестабільність у великому числі вузлів.

Mesh-режим (802.11s) передбачає створення багатоетапних маршрутів між точками доступу, що дає можливість будувати великі покриття у складних середовищах без прямого дротового з’єднання кожної точки. Рисунок 1.3 демонструє приклад Mesh-архітектури.

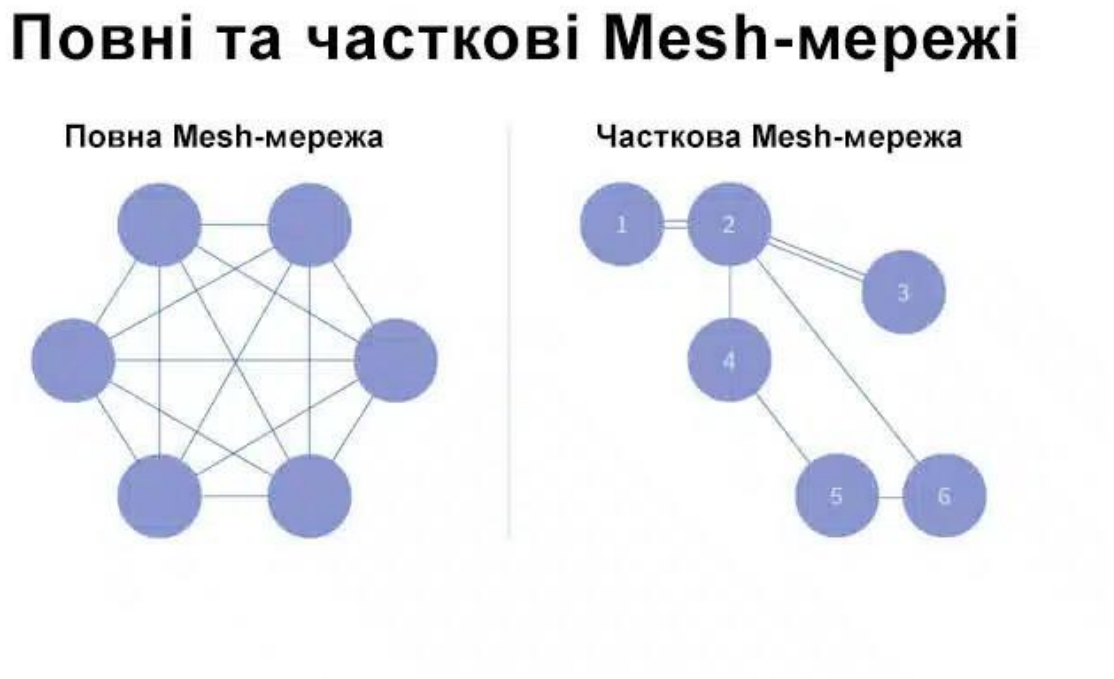


Рис. 1.3 Приклад Mesh-топології в Wi-Fi мережі

Mesh підтримує автоматичний вибір оптимального маршруту, балансування навантаження та резервування шляхів. Точки доступу або спеціалізовані пристрої можуть працювати в режимі повторювача, відтворюючи та посилюючи сигнал від основного AP. Це дозволяє збільшити покриття мережі, але знижує пропускну здатність.

Принципи доступу до середовища передавання даних.

Однією з ключових особливостей Wi-Fi є використання методу CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) — багаторазового доступу з уникненням колізій. Основні етапи CSMA/CA:

- Клієнт «прослуховує» середовище — перевіряє, чи вільний канал.
- При вільному каналі клієнт очікує випадковий інтервал backoff.
- Після зменшення лічильника backoff кадр передається.
- Точка доступу підтверджує отримання кадру (ACK).

Якщо ACK не отримано — повторна передача.

Формально ймовірність колізії у середовищі з n активними станціями можна описати:

$$P_{col} = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (1.1)$$

де

τ – ймовірність, що станція ініціює передачу,

n – кількість станцій.

Зі збільшенням кількості активних пристроїв різко зростає ймовірність колізій, що пояснює падіння швидкості Wi-Fi у щільних мережах.

Процеси автентифікації, асоціації та управління з'єднанням. Функціонування клієнта в мережі Wi-Fi починається з процесів виявлення та приєднання. Етапи з'єднання клієнта:

- Scanning – клієнт сканує діапазони та шукає доступні SSID.
- Authentication – початковий обмін повідомленнями між клієнтом і точкою доступу.
- Association – клієнт надсилає запит на приєднання, AP виділяє клієнту асоціаційний ID.

- Key exchange – встановлення криптографічних ключів WPA2/WPA3.
- Data transfer – початок обміну даними.

Процеси можуть повторюватися при переміщенні клієнта між точками доступу. Це явище називається роумінгом, і для нього важливою є мінімізація затримок при повторній автентифікації.

Логічна структура та організація кадрів IEEE 802.11. Кадри Wi-Fi значно складніші за кадри Ethernet, оскільки вони мають підтримувати:

- керування доступом;
- координацію пересилання;
- зменшення колізій;
- сегментацію та відновлення пакетів;
- ідентифікацію точок доступу.

Кадри поділяються на три категорії:

- Data frames – передають корисні дані.
- Control frames – RTS, CTS, ACK тощо.
- Management frames – Beacon, Probe, Authentication, Association.

На рис. 1.4 наведено узагальнену структуру кадру IEEE 802.11.

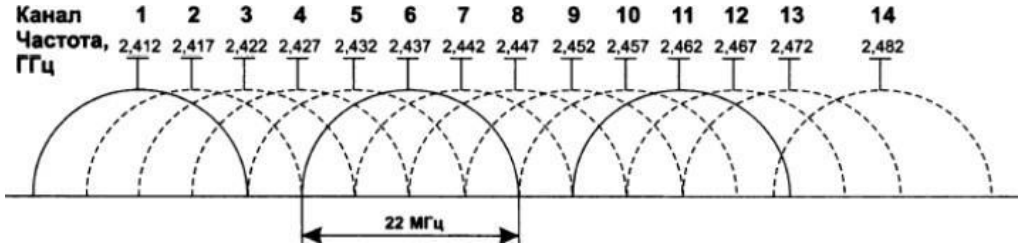


Рис. 1.4 Принципова структура кадру IEEE 802.11

Кожне поле має свою функцію: Frame Control визначає тип кадру; Duration управляє захопленням середовища; MAC-адреси описують маршрут руху кадру; поле Sequence Control синхронізує послідовність кадрів; FCS забезпечує контроль цілісності.

Особливості взаємодії Wi-Fi з дротовою інфраструктурою. Точка доступу виконує роль мосту між бездротовою та дротовою мережами. Завдяки системі розподілу DS кадри можуть перенаправлятися між різними сегментами LAN, VLAN або WAN. AP виконує функції:

- перетворення кадрів 802.11 у кадри Ethernet;
- інтеграцію у маршрутизовану інфраструктуру;
- реалізацію VLAN через 802.1Q;
- взаємодію з контролером (у корпоративних мережах).

У контролерних архітектурах (наприклад, Cisco WLC, Aruba Mobility Controller) точки доступу працюють як тонкі клієнти, а всі рішення щодо управління приймає централізований контролер. Це забезпечує:

- оптимальний вибір каналів;
- рівномірний розподіл навантаження;
- автоматичне керування потужністю;
- швидкі хендовери під час роумінгу.

Проблеми функціонування архітектури Wi-Fi у реальних умовах. Попри продуману архітектуру, Wi-Fi стикається з низкою проблем:

- перевантаженість у діапазоні 2.4 ГГц;
- взаємозавадність між сусідніми AP;
- складність управління великою кількістю клієнтів;
- "липкі клієнти", що не переходять на ближчі AP;
- обмеження ширини каналу у 2.4 ГГц;
- падіння швидкості на великих відстанях;
- шумове середовище промислових та офісних об’єктів.

Ці недоліки стали стимулом для розробки механізмів динамічного управління середовищем, які реалізовано у нових стандартах Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6.

1.3. Основні стандарти Wi-Fi та їх еволюція

Розвиток стандартів IEEE 802.11 відбувався в декілька етапів, кожен з яких знаменував суттєві зміни у можливостях бездротових мереж. Еволюція Wi-Fi пов’язана зі зростанням потреби у високошвидкісній передачі даних, появою великої кількості клієнтських пристроїв, розвитком мультимедійних сервісів та наближенням бездротового доступу до дротових технологій за пропускною здатністю.

Кожна нова версія стандарту не просто збільшувала теоретичну швидкість, а вводила важливі технологічні механізми — MIMO, OFDM, MU-MIMO, Beamforming, OFDMA, BSS Coloring, Target Wake Time — які покращували спектральну ефективність, зменшували затримки та підвищували стабільність роботи мереж.

На рис. 1.5 наведено загальну еволюцію стандартів Wi-Fi від початкової версії 802.11 до сучасних реалізацій Wi-Fi 6/6E та Wi-Fi 7.

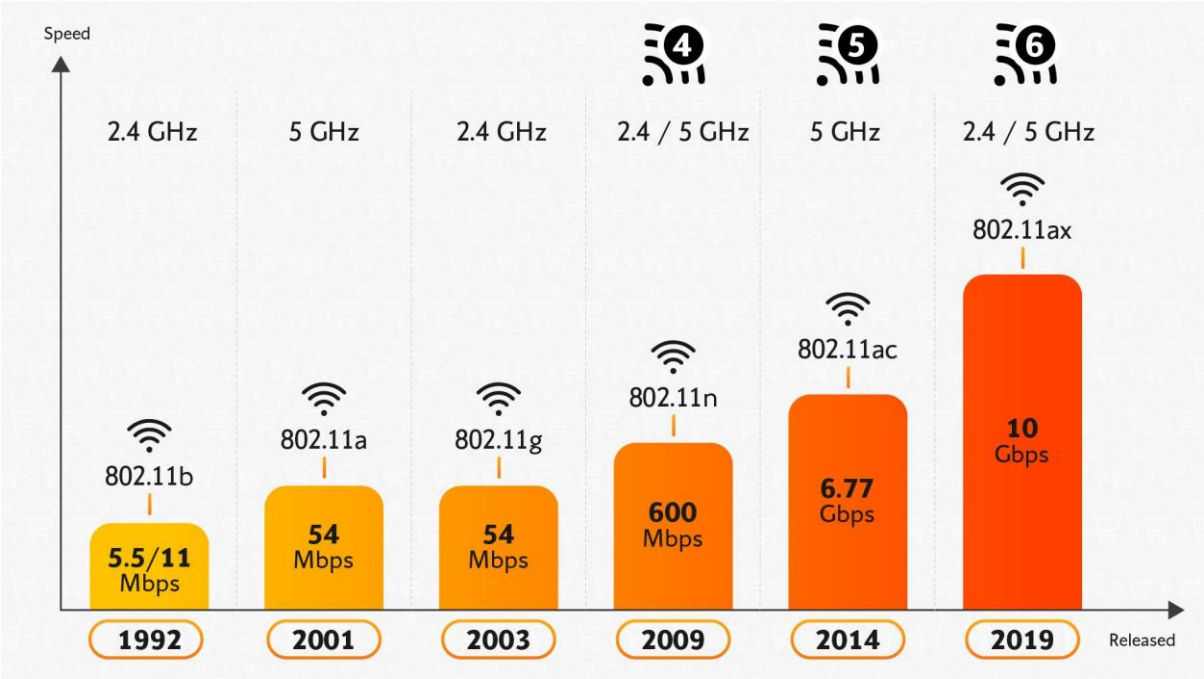


Рис. 1.5 Еволюція стандартів Wi-Fi від 802.11 до Wi-Fi 7

Первинні стандарти 802.11 та їх обмеження. Перший стандарт IEEE 802.11-1997 забезпечував швидкості 1–2 Мбіт/с та використовував базові методи розширення спектра DSSS і FHSS. Ці значення були достатніми для тогочасних задач, проте вони не могли відповідати зростаючим вимогам до мультимедійного контенту, інтерактивних сервісів та передачі великих обсягів даних.

Недоліки першої версії стандарту:

- низька пропускна здатність;
- нестійкість до перешкод;
- висока затримка;
- невелика дальність у порівнянні з пізнішими реалізаціями;
- обмежена масштабованість мережі.

Цей стандарт став фундаментом подальшого розвитку бездротових систем, але швидко застарів.

Стандарти 802.11b, 802.11a та 802.11g — перше покоління високошвидкісного Wi-Fi. Після первинної версії IEEE представив три важливі модифікації, які сформували перше покоління швидкісних WLAN.

802.11b (1999 р.) — масове впровадження Wi-Fi. Стандарт працював у діапазоні 2.4 ГГц і забезпечував швидкість до 11 Мбіт/с завдяки використанню модуляції CCK (Complementary Code Keying).

Переваги:

- велике покриття;
- низька вартість обладнання;
- простота розгортання.

Недоліки:

- сильна завадність у 2.4 ГГц;
- низька спектральна ефективність;
- обмежена кількість неконфліктних каналів (3 канали по 20 МГц).

802.11a (1999 р.) — перший Wi-Fi у 5 ГГц. На відміну від 802.11b, стандарт 802.11a працював у 5-гігагерцовому діапазоні й використовував OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Це дозволило досягти швидкості 54 Мбіт/с.

Переваги 802.11a:

- велика кількість доступних каналів;
- низька завадність;
- висока швидкість передачі.

Недоліки:

- дорожче обладнання;
- менша дальність через сильніше затухання сигналу в 5 ГГц.

802.11g (2003 р.) — об’єднання переваг попередників. 802.11g поєднав OFDM із діапазоном 2.4 ГГц, забезпечивши швидкість до 54 Мбіт/с. Недоліком 802.11g була необхідність підтримувати сумісність із 802.11b, що призводило до падіння швидкості в змішаних мережах через механізми RTS/CTS.

Стандарт 802.11n — перехід до MIMO та широких каналів. Поява стандарту 802.11n (2009 р.) стала поворотним моментом у розвитку Wi-Fi. Він уперше представив технології:

- MIMO (Multiple Input Multiple Output) — передачу сигналів з використанням кількох антен;
- канальне агрегацію (channel bonding) — можливість об’єднання двох 20-МГц каналів у один 40-МГц канал;
- STBC (Space–Time Block Coding) — підвищення стійкості до багатопроменевого поширення;
- Beamforming — спрямування сигналу у бік клієнта.

Теоретична максимальна швидкість досягала 600 Мбіт/с (4×4 MIMO, 40 МГц, GI=400 нс). Основними перевагами стали:

- покращення спектральної ефективності;
- зростання покриття мережі;
- підвищення стійкості до перешкод;
- можливість роботи у діапазонах 2.4 ГГц та 5 ГГц.

Завдяки цим характеристикам 802.11n став першим стандартом, який дозволив Wi-Fi конкурувати з дротовим Ethernet у багатьох сценаріях.

Стандарт 802.11ac — Wi-Fi 5 та перехід до багатокористувацьких мереж. У 2013 році був ухвалений стандарт 802.11ac, який використовував лише діапазон 5 ГГц та передбачав значне розширення можливостей мережі. Ключові технологічні нововведення 802.11ac:

- 80/160 МГц канали — збільшення пропускної здатності.
- 256-QAM модуляція — підвищення спектральної ефективності.
- MU-MIMO — одночасне обслуговування кількох клієнтів.

Beamforming — точне спрямування сигналу. Удосконалений MAC-рівень з покращеним управлінням чергами. Максимальна швидкість може досягати 6.9 Гбіт/с у конфігураціях 8×8 MIMO.

На рис. 1.6 наведено порівняння швидкостей стандартів Wi-Fi до 802.11ac.

IEEE Standard	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ax
Year Released	1999	1999	2003	2009	2014	2019
Frequency	5Ghz	2.4GHz	2.4GHz	2.4Ghz & 5GHz	2.4Ghz & 5GHz	2.4Ghz & 5GHz
Maximum Data Rate	54Mbps	11Mbps	54Mbps	600Mbps	3.6Gbps	10-12Gbps

Рис. 1.6 Порівняльні швидкості Wi-Fi стандартів від 802.11b до 802.11ac

Стандарт 802.11ax — Wi-Fi 6 / Wi-Fi 6E. Впровадження Wi-Fi 6 у 2019 році ознаменувало нову епоху, у якій ключовим критерієм стала не пікова швидкість, а ефективність передачі у високонавантажених середовищах — офісах, торговельних центрах, стадіонах, багатоквартирних будинках. Стандарт 802.11ax представив низку революційних механізмів:

- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access);
    - Один канал розбивається на ресурсні блоки, які можуть призначатися різним клієнтам одночасно. Це аналог LTE/5G у Wi-Fi;
- BSS Coloring;
    - Введення кольорових міток BSS дозволяє станціям відрізняти власну мережу від сусідніх і зменшує інтерференцію;

- TWT (Target Wake Time);
    - Механізм, що дозволяє клієнтам «прокидатися» лише у визначений момент — економія енергії IoT;
- 1024-QAM;
    - Підвищення спектральної ефективності на ~25% у порівнянні з 256-QAM;
- Підтримка діапазону 6 ГГц (Wi-Fi 6E);
    - Широкі канали 80–160 МГц та низький рівень шуму.

Завдяки цим технологіям Wi-Fi 6 забезпечує швидкість до 9.6 Гбіт/с, але головною перевагою є вчетверо більша ефективність у щільних середовищах.

Wi-Fi 7 — наступний етап розвитку (802.11be). В основі Wi-Fi 7 лежить концепція надшвидкісного, надстабільного та мультиканального доступу. Нововведення Wi-Fi 7:

- 4096-QAM — збільшення спектральної ефективності на 20%.
- 320 МГц канали — удвічі більша ширина, ніж у Wi-Fi 6.
- Multi-Link Operation (MLO) — одночасна робота у 2.4, 5 і 6 ГГц.
- Enhanced MU-MIMO до 16 потоків.
- Наднизькі затримки (<2 мс) — оптимально для VR/AR, cloud gaming.

Wi-Fi 7 позиціонується як доповнення до 5G-мереж і використовується для високопродуктивних сценаріїв.

У табл. 1.1 показана порівняльна таблиця еволюції стандартів Wi-Fi.

Стандарт	Рік	Діапазон	Макс. швидкість	Канали	Модуляція	Особливості
802.11b	1999	2.4 ГГц	11 Мбіт/с	20 МГц	CCK	Масовий Wi-Fi
802.11a	1999	5 ГГц	54 Мбіт/с	20 МГц	OFDM	Висока швидкість
802.11g	2003	2.4 ГГц	54 Мбіт/с	20 МГц	OFDM	Сумісність із b
802.11n	2009	2.4/5 ГГц	600 Мбіт/с	20/40	OFDM	MIMO, STBC
802.11ac	2013	5 ГГц	6.9 Гбіт/с	80/160	256-QAM	MU-MIMO
802.11ax	2019	2.4/5/6 ГГц	9.6 Гбіт/с	20–160	1024-QAM	OFDMA, TWT
802.11be	2024	2.4/5/6 ГГц	30+ Гбіт/с	320	4096-QAM	MLO, 16×16 MIMO

Табл. 1.1 Еволюція стандартів Wi-Fi

Аналіз тенденцій розвитку Wi-FiЕволюцію Wi-Fi можна описати трьома глобальними тенденціями:

- Перехід від збільшення швидкості до підвищення ефективності
  - 802.11b → g → n → ac — акцент на бітрейт
  - 802.11ax → be — акцент на стабільність, багатокористувацький доступ, низькі затримки.
- Зміна спектру та розширення діапазонів

    - ГГц → шумний, але далекобійний
    - 5 ГГц → оптимальний для продуктивності
    - 6 ГГц → ідеальний для широких каналів та низької інтерференції
- Радикальне покращення MAC-та PHY-механізмів
    - OFDMA замість CSMA/CA у щільних мережах
    - MIMO → MU-MIMO → Massive MIMO
    - Beamforming третього покоління
    - інтелектуальне управління енергією у IoT

Методи модуляції та доступу до середовища передавання даних. Модуляція сигналу та механізми доступу до середовища передавання є ключовими елементами фізичної та канальної підсистем стандарту IEEE 802.11. Вони визначають, яким чином цифрова інформація перетворюється на електромагнітний сигнал, як цей сигнал поширюється радіоканалом, які обмеження виникають у процесі передачі й які методи використовуються для забезпечення максимально можливих швидкостей та стійкості з'єднання. Еволюція модуляційних методів Wi-Fi тісно пов'язана зі збільшенням вимог до пропускної здатності, ефективності використання спектра, стабільності сигналу та мінімізації впливу завад, що особливо важливо у щільних радіомережах.

У цій частині буде детально розглянуто методи модуляції, які застосовувались у різних поколіннях стандарту IEEE 802.11, а також алгоритми доступу до середовища, що забезпечують координацію між безліччю пристроїв, які працюють у спільному радіоканалі. На рисунку 1.6 показано узагальнену класифікацію модуляційних технологій Wi-Fi від первинних методів FHSS/DSSS до сучасних ортогональних методів OFDM/OFDMA.

Standard	Modulation Type	Modulation Technique
802.11a	BPSK, QPSK,16-QAM, 64-QAM	OFDM
802.11b	BPSK, QPSK,16-QAM, 64-QAM	DSSS
802.11g	BPSK, QPSK,16-QAM, 64-QAM	OFDM
802.11n	BPSK, QPSK,16-QAM, 64-QAM	OFDM
802.11ac	BPSK, QPSK,16-QAM, 64-QAM, 25G QAM	OFDM
802.11ax	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 25G QAM, 1024-QAM	OFDMA

Рис. 1.6 Еволюція методів модуляції у Wi-Fi від 802.11b до 802.11ax.

Модуляція та розширення спектра в ранніх стандартах (802.11, 802.11b). Ранні реалізації Wi-Fi мали обмежені можливості щодо пропускної здатності, однак вони доповнили наукову базу для розвитку бездротових технологій. Перший стандарт IEEE 802.11 (1997 р.) забезпечував швидкість до 2 Мбіт/с і використовував два основні методи розширення спектра – FHSS та DSSS, кожен з яких мав свої особливості й призначення.

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). FHSS базується на періодичному стрибкоподібному переході несучої частоти за заздалегідь визначеною псевдовипадковою послідовністю. У цьому процесі весь доступний спектр поділяється на набір вузьких каналів (зазвичай 1 МГц), між якими радіомодуль здійснює перестрибування з високою частотою. Переваги FHSS:

- стійкість до вузькосмугових перешкод;
- краща захищеність від перехоплення;
- простота реалізації.

Недоліки:

- низька пропускна здатність (1–2 Мбіт/с);
- складність синхронізації між пристроями;
- обмежена масштабованість при збільшенні кількості користувачів.

Стрибкоподібна перебудова частоти дозволяла обійти завади, але суттєво ускладнювала реалізацію високошвидкісної передачі.

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). DSSS забезпечує розширення спектра шляхом множення переданого сигналу на високочастотну псевдовипадкову послідовність – так звану “chip sequence”. У 802.11b для досягнення швидкості 11 Мбіт/с було застосовано модуляцію CCK (Complementary Code Keying).

На рисунку 1.7 показано загальний принцип роботи DSSS.

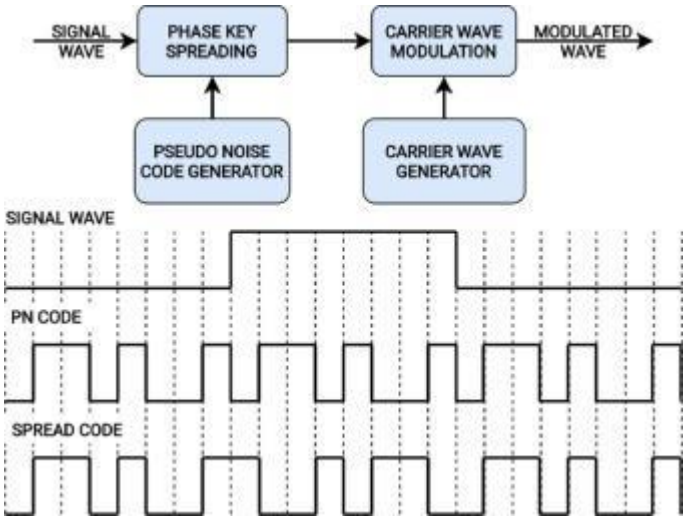


Рис. 1.7 Принцип формування DSSS сигналу

DSSS забезпечує:

- більшу стійкість до перешкод порівняно з FHSS;
- можливість передачі даних зі швидкістю до 11 Мбіт/с;
- кращу корекцію помилок.

Недоліком DSSS була низька спектральна ефективність (0.1–0.2 біт/Гц), яка стала критичною у міру зростання попиту на пропускну здатність.

OFDM – основа високошвидкісних стандартів 802.11a/g/n/ac/ax. Переломним моментом у розвитку Wi-Fi стала поява OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) у 802.11a (1999 р.), а пізніше в 802.11g. Це дало можливість Wi-Fi перейти від низькоспектральних технологій до високошвидкісного широкосмугового передавання. OFDM передбачає

поділ широкого каналу (20, 40, 80 або 160 МГц) на велику кількість вузьких ортогональних піднесучих. Кожна піднесуча модулюється незалежно (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM тощо).

Переваги OFDM:

- висока спектральна ефективність;
- стійкість до багатопроменевого поширення;
- низький рівень міжсимвольної інтерференції (ISI);
- можливість гнучкого масштабування швидкості.

Сигнал OFDM формується шляхом застосування оберненого швидкого перетворення Фур'є (IFFT), після чого він передається в ефір. Приймальна сторона виконує протилежну операцію (FFT), відновлюючи цифрові дані.

Формула пропускної здатності OFDM:

$$C = N \cdot \log_2(M) \cdot R_s \tag{1.2}$$

де:

N — кількість піднесучих,

M — рівень модуляції,

R_s — швидкість символів.

OFDM став базовою технологією у стандартах 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac та 802.11ax.

QAM – квадратурно-амплітудна модуляція у Wi-Fi

Квадратурно-амплітудна модуляція (QAM) дозволяє одночасно кодувати інформацію у фазі та амплітуді сигналу. Чим більше комбінацій (точок у сузір’ї), тим більше бітів передається одним символом.

Порівняння QAM:

Модуляція	Біт/символ	Необхідний SNR
QPSK	2	~9 dB
16-QAM	4	~16 dB
64-QAM	6	~23 dB
256-QAM	8	~30 dB
1024-QAM	10	~37 dB
4096-QAM	12	> 41 dB

Табл.1.2 Порівняння QAM

Сучасні стандарти Wi-Fi 6 і Wi-Fi 7 використовують 1024-QAM та 4096-QAM відповідно, що значно збільшує спектральну ефективність.

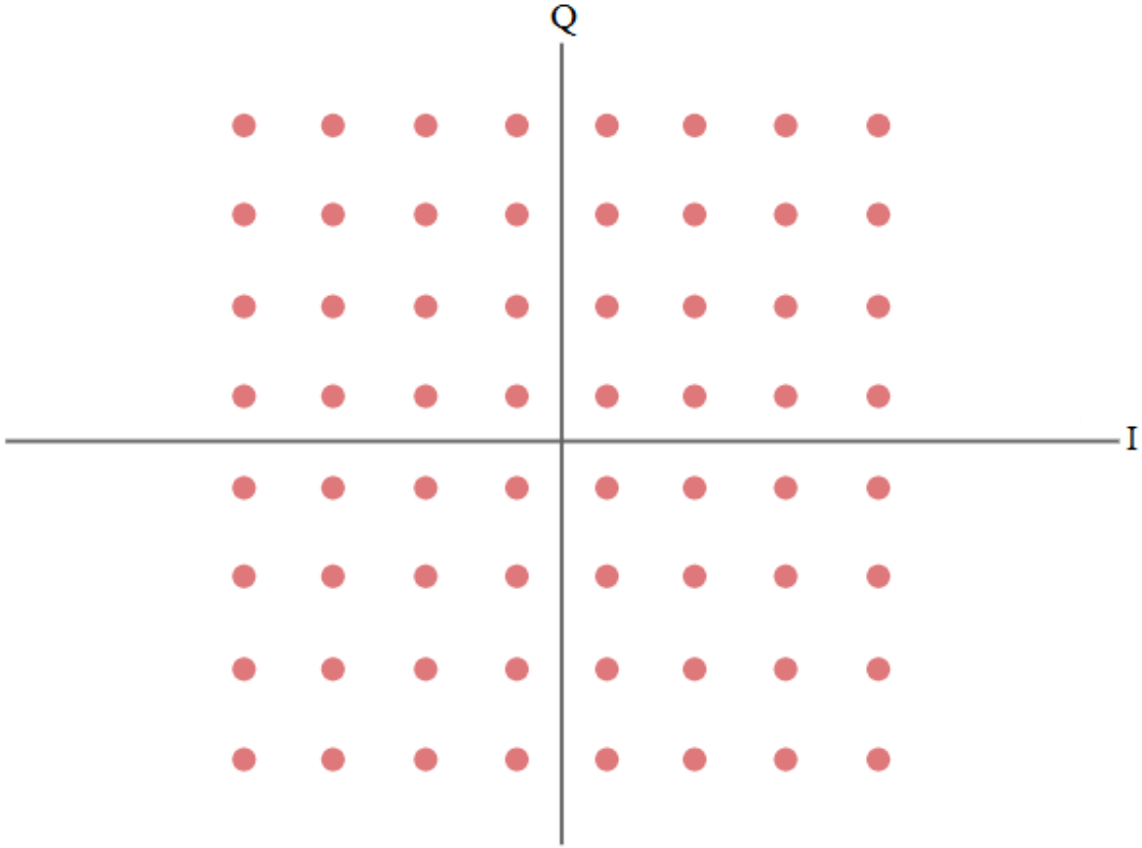


Рис. 1.8 Сузір’я 64-QAM (розподіл точок)

MIMO – багатопотокова передача для збільшення швидкості. Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) була вперше запроваджена в стандарті 802.11n і дозволила використовувати багатопроменевість середовища на користь передавання даних.

Принцип MIMO:

1. передавач використовує кілька антен для одночасного передавання незалежних потоків;
2. приймач також має кілька антен для коректного прийому потоків;
3. значно підвищується пропускна здатність без збільшення ширини каналу.

Пропускна здатність:

$$C_{MIMO} = \min(N_t, N_r) \cdot C_{SISO} \tag{1.3}$$

де:

N_t — кількість передавальних антен,

N_r — приймальних.

802.11n використовував до 4 потоків, 802.11ac — до 8, а Wi-Fi 7 – до 16 потоків.

Beamforming – направлене формування променя, технологія, що дозволяє точці доступу спрямовувати радіосигнал у бік конкретного клієнта шляхом зміни фазових характеристик антен. На рис. 1.9 показано принцип роботи Beamforming.

Переваги:

- збільшення дальності дії сигналу;
- покращення SNR у точці прийому;

- зменшення перешкод для інших клієнтів;
- підвищення ефективності MIMO.

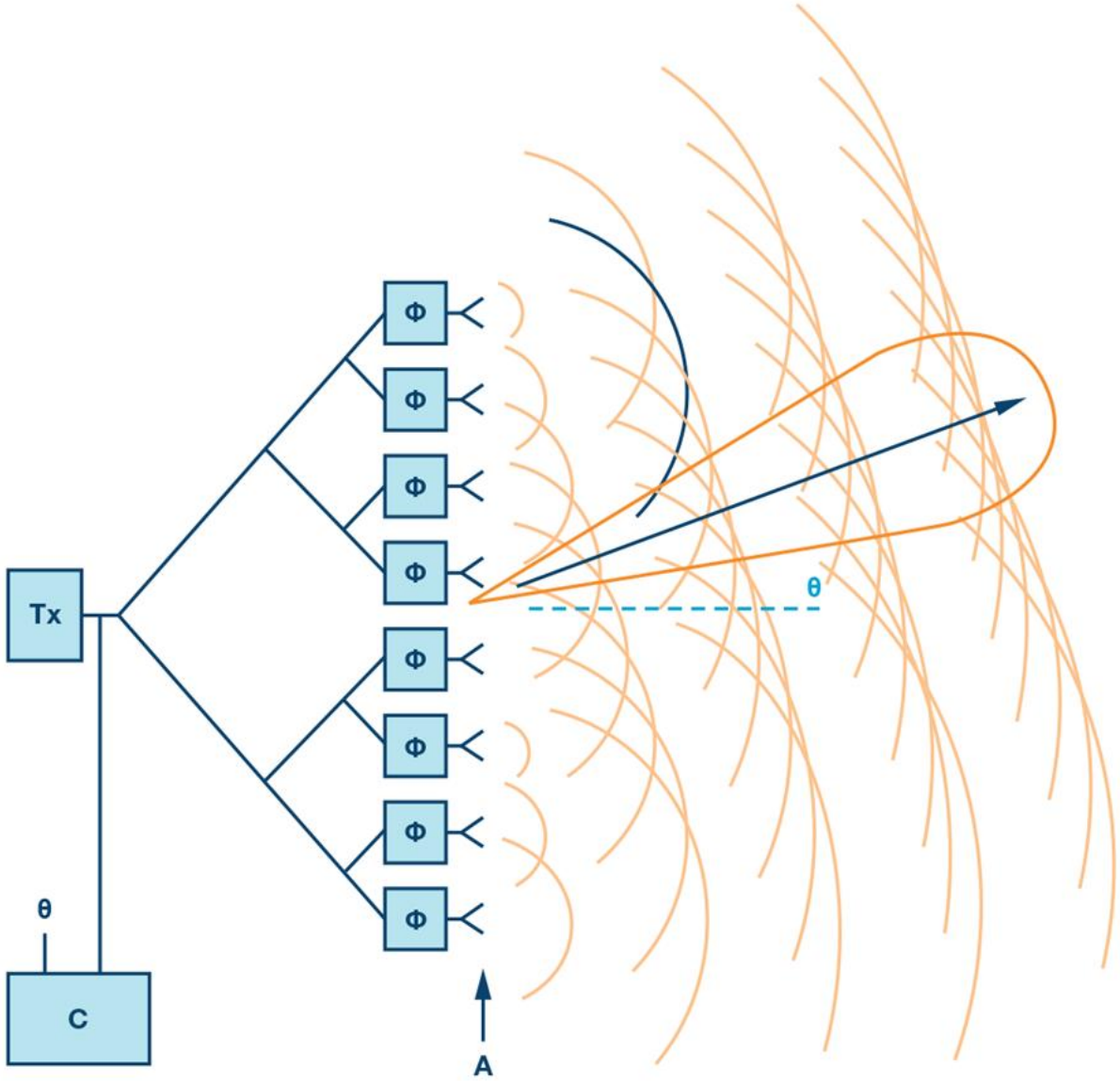

Φ
Φ
Φ
Φ
Φ
Φ
Φ
Φ
Tx
θ
C
A
θ

Рис. 1.9 Формування променя у напрямку клієнта за допомогою MIMO

OFDMA – основа багатокористувацького доступу у Wi-Fi 6. Вперше у Wi-Fi з'явилося розподілення каналу між клієнтами на рівні піднесучих. Це було реалізовано в 802.11ax. OFDM → один користувач у каналі, OFDMA → багато користувачів одночасно. Ресурсний блок (RU) — мінімальна одиниця частоти, що може бути призначена клієнту.

Переваги OFDMA:

- різке зниження затримок;
- значне підвищення ефективності в щільних мережах;
- оптимізація трафіку малого розміру (IoT);
- зменшення колізій.

MU-MIMO – одночасне обслуговування кількох клієнтів. MU-MIMO (Multi-User MIMO) стало ключовим кроком у Wi-Fi 5 і Wi-Fi 6. Раніше MIMO дозволяв збільшувати пропускну здатність одного клієнта. MU-MIMO дозволило розділяти антенні ресурси між багатьма клієнтами. Типи MU-MIMO:

- DL MU-MIMO — точка доступу передає дані кільком клієнтам;
- UL MU-MIMO (802.11ax) — кілька клієнтів можуть одночасно відправляти дані.
- Це суттєво зменшує конкуренцію між клієнтами за канал.

Алгоритми доступу до середовища у Wi-Fi, основні механізми:

1. CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
    a. Клієнт не передає кадр, доки канал зайнятий.

i. Алгоритм включає:

1. прослуховування ефіру (Clear Channel Assessment);
2. випадковий Backoff;
3. передавання кадру;
4. отримання ACK.

b. Вірогідність колізій:

$$P_{col} = 1 - (1 - \tau)^{(n-1)} \quad (1.3)$$

де:

τ — ймовірність передачі,

n — кількість клієнтів.

2. RTS/CTS – уникнення прихованих вузлів. Прихований вузол — клієнт, який не «бачить» інших клієнтів, але створює колізії. RTS/CTS вирішує цю проблему:

- клієнт надсилає запит RTS;
- точка доступу відповідає CTS;
- канал резервується для цього передавання.

3. NAV (Network Allocation Vector) визначає період часу, протягом якого канал зайнятий. Інші клієнти не передають у цей проміжок.
4. EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) – механізм QoS у 802.11e

Кожному типу трафіку призначаються власні параметри доступу:

- пріоритет;
- довжина черги;
- мінімальний та максимальний Backoff.

Це дозволяє пріоритезувати мультимедійні потоки (VoIP, відео). Аналітичне порівняння методів модуляції та доступу

У таблиці 1.4 наведено порівняння основних технологій.

Технологія	Переваги	Недоліки	Типові стандарти
DSSS	Висока стійкість	Низька швидкість	802.11b
OFDM	Висока спектральна ефективність	Чутливість до частотних помилок	802.11a/g
MIMO	Збільшення швидкості	Багато антен	802.11n

MU-MIMO	Підтримка багатьох клієнтів	Залежить від SNR	802.11ac/ax
OFDMA	Мінімальні затримки	Складність реалізації	802.11ax
4096-QAM	Максимальна швидкість	Дуже високий SNR	802.11be

1.5. Показники ефективності Wi-Fi мереж

Оцінювання ефективності Wi-Fi мережі є фундаментальною задачею, яка дозволяє визначити рівень продуктивності бездротового середовища, стабільність роботи користувацьких пристроїв, стійкість до завад, а також якість надання сервісів. Показники ефективності є комплексними характеристиками, що формуються з урахуванням фізичних умов поширення радіохвиль, параметрів модуляції, механізмів доступу до середовища та завантаженості каналу. У сучасних Wi-Fi мережах ефективність визначається не лише максимальною можливою швидкістю, але й здатністю мережі стабільно працювати у високонавантажених і зашумлених умовах.

1.5.1. Пропускна здатність та фактична швидкість передавання даних

Пропускна здатність є одним із базових параметрів оцінки ефективності Wi-Fi. Вона визначає, з якою швидкістю дані можуть передаватися між точкою доступу та клієнтом у конкретних умовах.

Теоретична швидкість (PHY rate)

Це максимальна швидкість, що визначена стандартом для конкретного MCS, ширини каналу та кількості потоків MIMO.

Основна формула:

$$R_{PHY} = N_{sc} \cdot \log_2(M) \cdot R_c \cdot \frac{1}{T_s}$$

де:

N_{sc} — кількість піднесучих;

M — порядок модуляції QAM;

R_c — коефіцієнт кодування;

T_s — тривалість OFDM-символу.

Наприклад:

802.11ax із 1024-QAM, 160 МГц і 4×4 MIMO може теоретично досягати 4.8–9.6 Гбіт/с.

Реальна швидкість (MAC throughput)

Реальна пропускна здатність залежить від факторів:

інтервали Backoff у CSMA/CA;

втрати пакетів;

міжрамкові інтервали (IFS);

службові кадри (Beacon, ACK);

повторні передачі;

наявність інших користувачів.

Для класичних Wi-Fi:

У 802.11n реальна швидкість — 40–60 % від теоретичної.

У 802.11ac — 50–70 %.

У Wi-Fi 6 (OFDMA, MU-MIMO) — до 80 % у добре спроєктованій мережі.

Пропускна здатність у Wi-Fi є статистично змінною величиною, і її аналіз вимагає врахування десятків параметрів каналу.

1.5.2. Затримка (Latency) у Wi-Fi мережах

Затримка є критично важливою характеристикою, особливо для сервісів реального часу — VoIP, відеоконференцій, онлайн-ігор, AR/VR систем.

Загальна затримка складається з:

Затримка доступу (MAC delay)

Виникає через CSMA/CA, коли пристрій очікує на вільний канал.

Ця затримка може становити від 3–5 мс у ненавантажених мережах до 50–200 мс у перевантажених.

Чергові затримки (Queueing delay)

Викликані накопиченням кадрів у чергах точки доступу.

Модуляційні затримки (PHY delay)

Залежать від тривалості символу OFDM та Guard Interval.

Затримки маршрутизації (Network delay) Вступають у дію при виході трафіку за межі Wi-Fi сегмента.

У стандарті 802.11ax були введені механізми оптимізації затримки:

OFDMA забезпечує одночасну передачу від багатьох клієнтів;

UL MU-MIMO зменшує конфлікти в uplink;

Target Wake Time оптимізує розклад активності клієнтів.

Завдяки цьому середня затримка у Wi-Fi 6 зменшується у 2–4 рази порівняно з 802.11ac.

1.5.3. Джиттер (Jitter) — варіація затримки між пакетами

Джиттер є ключовим параметром для мультимедійних сервісів, оскільки навіть незначна нерівномірність доставки пакетів може призвести до:

розсинхронізації звуку та відео;

ривків, зависань;

погіршення якості голосового зв’язку;

зниження якості у VR/AR.

Джиттер визначають як:

$J = |D_{i+1} - D_i|$

де D_i — затримка і-го пакету.

Оптимальні значення:

< 30 мс для відео;

< 20 мс для VoIP;

< 5 мс для ігор;

< 1 мс для AR/VR.

OFDMA суттєво зменшує джиттер, оскільки:

кожен клієнт отримує свій ресурсний блок;

зменшуються конфлікти при доступі до каналу;

передача відбувається у запланований інтервал часу.

1.5.4. Рівень сигналу (RSSI) та співвідношення сигнал/шум (SNR)

Рівень сигналу (RSSI)

RSSI вимірюється в dBm і показує потужність сигналу на приймачі.

Типові пороги:

−30…−50 dBm — відмінний сигнал;

−50…−65 dBm — добрий сигнал;

−65…−75 dBm — задовільний;

нижче −75 dBm — поганий, нестабільний.

RSSI впливає на MCS — чим слабкіший сигнал, тим нижчий рівень модуляції.

SNR (Signal-to-Noise Ratio)

SNR визначає здатність приймача коректно декодувати сигнали.

$$SNR = RSSI - N$$

де (N) — рівень шуму, зазвичай від −90 до −105 dBm.

Для складних модуляцій:

256-QAM	→	30–33	dB
1024-QAM	→	35–38	dB
4096-QAM	→	41–45	dB

Чим більший порядок QAM, тим більше різниці повинно бути між точками сузір’я, і тим важче декодувати символи в шумному середовищі.

На рисунку 1.20 показано залежність модуляції від рівня SNR.

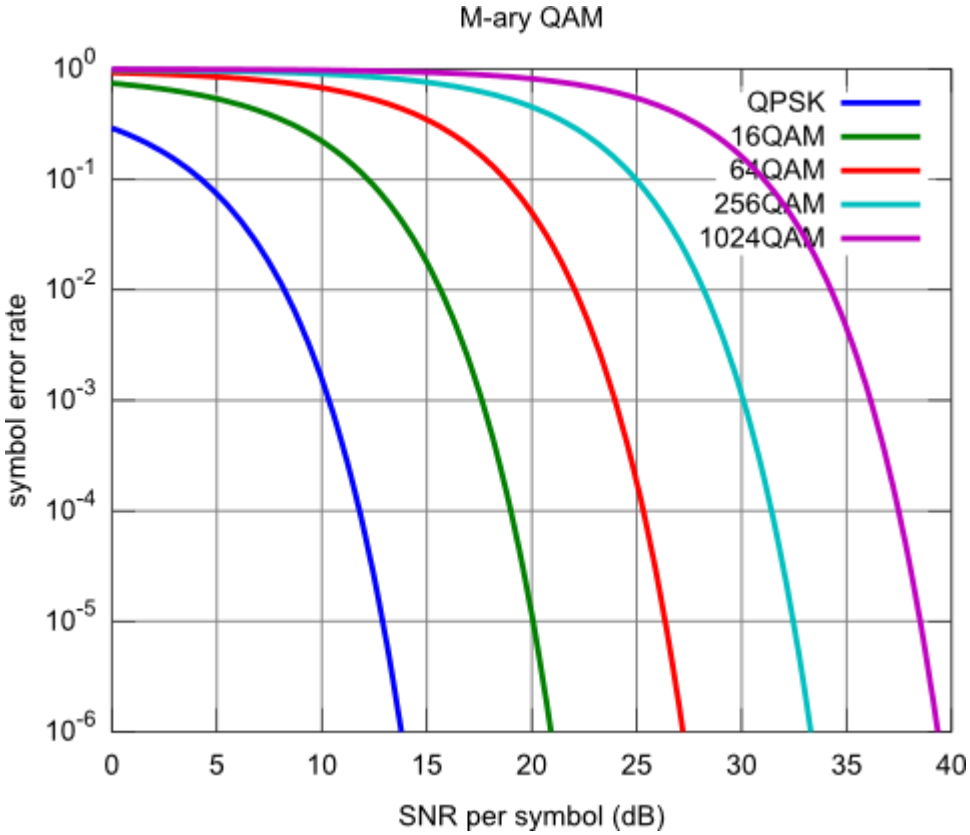


Рисунок 1.20 – Залежність рівня модуляції QAM від SNR.

1.5.5. Втрати пакетів (Packet Loss Rate, PLR)

Packet Loss Rate — це відсоток пакетів, які не надійшли до призначення.

Причини втрат:

низьке SNR;

перевантаження каналу;

інтерференція;

віддаленість клієнта;

переповнення черг;

колізії при CSMA/CA.

Оптимальні значення:

< 1 % для стандартних даних;

< 0.1 % для відео;

< 0.01 % для реального часу.

PLR безпосередньо впливає на повторні передачі (ARQ), що:

зменшує реальну пропускну здатність;

збільшує затримку;

погіршує якість мультимедійних сервісів.

Wi-Fi 6 суттєво знижує PLR за рахунок:

OFDMA;

кращої організації uplink;

вдосконалених механізмів коригування помилок.

1.5.6. Ефективність MAC-рівня (MAC Efficiency)

Ефективність MAC визначає, яку частину від PHY-швидкості реально отримує користувач.

$$\eta_{MAC} = \frac{R_{real}}{R_{PHY}} \cdot 100$$

Фактори, що знижують ефективність:

Backoff

Пристрій чекає випадковий час перед передаванням.

Колізії кадрів

Особливо у мережах 2.4 ГГц.

Службові кадри (Beacon, ACK, CTS, RTS)

Наприклад, Beacon-фрейми займають до 5 % ефіру.

Повторні передачі

Використання великої кількості дрібних пакетів

У Wi-Fi 6 ефективність значно зростає:

за рахунок OFDMA (багато клієнтів одночасно);

MU-MIMO (паралельні потоки);

BSS Coloring (менше помилкових уникнень);

Target Wake Time (менше конфліктів).

1.5.7. Продуктивність у багатокористувацькому середовищі

Цей показник відображає здатність мережі обслуговувати багато пристроїв одночасно без різкого зниження продуктивності.

Фактори:

конкуренція клієнтів за канал;

ефект “прихованого вузла”;

одночасні uplink-трансмісії;

різний рівень RSSI у кількох клієнтів.

Wi-Fi 6 вирішує ці проблеми завдяки:

UL/DL OFDMA;

UL/DL MU-MIMO;

BSS Coloring;

скороченому Guard Interval;

меншим Backoff-вікнам.

У результаті у щільних середовищах (офіси, аеропорти, стадіони) Wi-Fi 6 забезпечує в 4 рази більшу ефективність, ніж Wi-Fi 5.

1.5.8. Енергоспоживання клієнтських пристроїв

Ефективність Wi-Fi залежить також від того, наскільки енергоефективно працюють клієнтські пристрої.
У класичних Wi-Fi клієнт повинен постійно “слухати ефір”, що:
витрачає енергію;

зменшує час автономної роботи.

Стандарт Wi-Fi 6 вводить Target Wake Time (TWT):

клієнти “прокидаються” лише у запланований час;

зменшуються колізії uplink;

значно продовжується робота IoT-пристроїв (сенсорів, розумних лічильників).

Наприклад, датчик температури на Wi-Fi 6 може працювати від батареї до 6–7 разів довше, ніж у Wi-Fi 4.

1.5.9. Взаємозв’язок показників ефективності Wi-Fi

Показники ефективності Wi-Fi не існують ізольовано — вони тісно взаємопов’язані. Наприклад:

низький SNR → нижче MCS → менша швидкість → більша затримка;

велика кількість користувачів → більше Backoff → зростання джиттера;

інтерференція → втрати пакетів → повторні передачі → зниження MAC-ефективності;

широкий канал → вища швидкість, але → нижча стійкість до шуму;

високий MCS → вища швидкість, але → вищі вимоги до RSSI.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ Wi-Fi МЕРЕЖ

Сучасні бездротові мережі Wi-Fi характеризуються високим рівнем функціональної складності, багаторівневими механізмами управління радіоресурсами та потребою забезпечення якісного обслуговування великої кількості користувачів. Тому аналіз ефективності Wi-Fi неможливо звести лише до вимірювання швидкості передавання даних. Він включає дослідження завадостійкості, поведінки мережі в умовах високого навантаження, впливу інтерференції, особливостей розподілу радіоресурсів, механізмів доступу до середовища та параметрів QoS.

У цьому розділі виконано комплексний аналіз ефективності Wi-Fi мереж, що охоплює чинники, які визначають продуктивність бездротового сегмента, а також дослідження параметрів, що впливають на якість реальних сервісів –

відеодзвінків, потокового відео, онлайн-ігор, телеметричних IoT-систем тощо.

2.1. Фактори, що впливають на продуктивність Wi-Fi систем

Продуктивність Wi-Fi мережі визначається сукупністю чинників, які включають фізичні характеристики радіоканалу, особливості архітектури мережі, параметри розгортання точок доступу, поведінку клієнтських пристроїв, а також зовнішні умови роботи. Можна виділити кілька груп чинників.

2.1.1. Фізичні фактори радіосередовища

До цієї групи належать:

1. Дальність передачі та затухання

Затухання сигналу описується рівнянням:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

де

n – коефіцієнт втрат середовища (від 2 для відкритих просторів до 5–7 для будівель). При збільшенні відстані на кожні 6 дБ фактично зменшується доступна модуляція.

2. Перешкоди (шум, інтерференція)

Основні типи перешкод:

міжканальна інтерференція (co-channel interference, CCI);

сусідньоканальна інтерференція (ACI);

вузькосмугові шуми від побутових приладів;

індустріальні радіозавади.

3. Багатопроменевість та завмирання

Рівень похибки (BER) залежить від кількості відбитих хвиль, їх фази та амплітуди. В 802.11n/ac/ax MIMO перетворює багатопроменевість із проблеми в ресурс.

2.1.2. Фактори, пов’язані з параметрами стандарта Wi-Fi

У різних стандартів – різні можливості, наприклад:

Параметр	802.11n	802.11ac	802.11ax
Модуляція	64-QAM	256-QAM	1024-QAM

Доступ	OFDM	OFDM	OFDMA
MU-MIMO	DL	DL	UL + DL
Канал	20–40 МГц	20–160	20–160

Чим сучасніший стандарт, тим краща ефективність в умовах високого навантаження.

2.1.3. Архітектурні та топологічні фактори

1. Розташування точок доступу (AP Placement)

Занадто щільне розміщення → інтерференція;

занадто рідке → погане покриття.

2. Використання 2.4, 5 та 6 ГГц

2.4 ГГц: велика дальність, багато завад;

5 ГГц: оптимальний компроміс;

6 ГГц: висока швидкість, мала інтерференція.

3. Кількість клієнтів на одну точку доступу

Наприклад:

Wi-Fi 4 → оптимально до 15–20 клієнтів;

Wi-Fi 5 → 30–35;

Wi-Fi 6 → 50+ завдяки OFDMA.

2.1.4. Поведінка клієнтів

Клієнти мають різні здібності:

однопотокові / двопотокові радіомодулі;

різна підтримка MCS;

різна чутливість приймача;

різні алгоритми roaming.

Найслабший клієнт визначає MCS усієї групи в OFDM.

2.1.5. Особливості трафіку

Впливають:

розмір кадрів;

частота передачі;

реальний час чи фоновий трафік;

конфігурації QoS.

Наприклад, IoT-трафік з малими пакетами створює непропорційне навантаження на MAC.

2.2. Аналіз пропускної здатності та затримок у Wi-Fi мережах

Пропускна здатність і затримка є важливими характеристиками, що визначають якість роботи Wi-Fi у різних сценаріях. У цьому підрозділі виконуємо комплексний аналіз цих параметрів.

2.2.1. Модель пропускної здатності для Wi-Fi

Для обчислення реально доступної швидкості враховують:

$T = R_{PHY} \cdot \eta_{MAC} \cdot \eta_{RF}$

де

η_{MAC} — ефективність MAC-рівня (черги, Backoff);

η_{RF} — ефективність фізичного каналу (SNR, BER).

У середньому:

Wi-Fi 4 → 30–40 % від PHY;

Wi-Fi 5 → 40–60 %;

Wi-Fi 6 → 60–75 %.

2.2.2. Аналіз затримок у CSMA/CA

CSMA/CA створює стохастичну затримку, яка залежить від:

кількості користувачів в BSS;

рівня інтерференції;

типу трафіку.

Математична модель очікування:

$D = T_{IFS} + E[Backoff] + T_{frame} + T_{ACK}$

Для навантажених мереж D може збільшуватись у 10–20 разів.

2.2.3. Аналіз OFDMA затримок у Wi-Fi 6

OFDMA усуває проблему випадкового доступу:

клієнти передають у строго визначені “слоти”;

немає Backoff;

зменшуються колізії.

Завдяки цьому:

затримка падає з 40–60 мс до 8–12 мс у щільних мережах;

джиттер зменшується в 3–5 разів.

2.3. Вплив завад і інтерференції на якість передавання даних

2.3.1. Джерела інтерференції

Джерела: Bluetooth, СВЧ-піч, інші Wi-Fi, бездротові миші, відеокамери 2.4 ГГц.

2.3.2. Міжканальна та сусідньоканальна інтерференція

CCI і ACI — один із головних чинників зниження ефективності.

Проблеми:

CCI призводить до довшого Backoff;

ACI знижує SNR;

Wi-Fi 6 використовує BSS Coloring для мінімізації конфліктів.

2.3.3. Модель втрат пакетів у зашумленому середовищі

PLR можна описати:

$PLR = 1 - (1 - BER)^L$

L — довжина кадру.

Чим більший пакет → тим більша ймовірність помилки.

2.4. Оцінювання параметрів якості обслуговування (QoS)

QoS забезпечує пріоритезацію трафіку.

2.4.1. Класи обслуговування EDCA

EDCA вводить 4 черги:

Voice

Video

Best Effort

Background

Кожній черзі надається:

власний Backoff;

межі затримок;

пріоритети.

2.4.2. Аналіз роботи QoS у Wi-Fi 6

OFDMA і TWT забезпечили:

гарантовані часові інтервали;

мінімізацію конфліктів uplink;

стабільну доставку трафіку реального часу.

2.5. Проблеми безпеки та їх вплив на ефективність Wi-Fi

Безпека також впливає на ефективність.

2.5.1. Механізми шифрування та їх вплив

WPA2 використовує AES, що додає 3–10 % накладних витрат.

WPA3 – більш складні обчислення → до +15 % навантаження на слабких пристроях.

2.5.2. Оверхед у керуючих кадрах безпеки

Більше фреймів обміну ключами → менша ефективність у часі.

2.5.3. Напади типу “deauth” і їх наслідки

Атаки типу deauthentication тимчасово знижують ефективність, змушуючи клієнтів перепідключатися.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ Wi-Fi СИСТЕМ

Підвищення ефективності бездротових Wi-Fi мереж є одним із ключових напрямів розвитку сучасних телекомунікаційних систем. З огляду на стрімке зростання кількості клієнтських пристроїв, збільшення щільності житлової та комерційної забудови, а також підвищення вимог до якості передавання мультимедійного трафіку, виникає необхідність у комплексному вдосконаленні механізмів роботи Wi-Fi.

У цьому розділі розглянуто широкий спектр засобів оптимізації Wi-Fi мереж: від правильного розміщення точок доступу до застосування сучасних технологій OFDMA, MU-MIMO, BSS Coloring, динамічного вибору каналів, адаптивної зміни потужності, покращених механізмів безпеки й алгоритмів управління трафіком. Особливу увагу приділено математичним моделям оптимізації покриття, аналізу завадостійкості, а також методам підвищення ефективності в умовах високої щільності клієнтів.

3.1. Оптимізація розміщення точок доступу (AP Placement)

Розміщення точок доступу є базовим і найбільш критичним фактором оптимізації мережі. Неправильне розташування AP може спричинити:

«мертві зони» без сигналу;

надмірну інтерференцію;

перевантаження окремих AP;

затримки через CSMA/CA;

низький SNR на клієнтах;

зниження MCS та швидкості.

Тому планування AP повинно враховувати особливості радіопоширення, матеріал стін, щільність клієнтів, характеристики трафіку та вимоги сервісів.

3.1.1. Модель радіопокриття та зони обслуговування

Оцінка зони покриття базується на рівнянні вільного простору:

$PL(d) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44,$

але для приміщень використовується модель багатошарової екосистеми:

$$PL_{indoor}(d) = PL(d_0) + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \sum_{i=1}^{k} W_i,$$

де:

n — індекс затухання (2–7),

W_i — втрати від стін (гіпс 3–5 дБ, цегла 6–12 дБ, бетон 20–30 дБ).

3.1.2. Принцип “клітинної структури” Wi-Fi мережі

Для оптимального покриття АР формують шестикутну модель покриття, що мінімізує накладання каналів (за аналогією з мобільними мережами, але з меншим радіусом).

Ширина структури залежить від:

$$R = \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{P_{min}}},$$

де P_{min} — мінімальна потужність прийому (наприклад, −82 dBm для MCS0).

3.1.3. Рекомендації при оптимізації розміщення

Встановлювати АР у центрі обслуговуваної зони, не біля стін.

Уникати монтажу поруч із металевими поверхнями (елеватори, вентиляція).

Використовувати однакову висоту установки (переважно 2.5–3 м).

У великих залах — використовувати направлені антени.

Мінімізувати перетин зон покриття сусідніх AP > −65 dBm.

3.1.4. Автоматична оптимізація (AI/AP Placement)

У сучасних Wi-Fi 6/6E контролерах застосовуються алгоритми оцінювання покриття:

AI-моделі прогнозують навантаження;

проводиться динамічна оцінка спектру;

AP підбирають параметри потужності та каналів у реальному часі.

3.2. Використання сучасних стандартів Wi-Fi (802.11n/ac/ax/be)

Сучасні стандарти, особливо Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7, створені спеціально для роботи у щільних мережах із великою кількістю клієнтів.

3.2.1. Впровадження Wi-Fi 6 (802.11ax)

Wi-Fi 6 значно підвищує ефективність завдяки:

1. OFDMA

У каналі шириною 20 МГц:

234 піднесучі в OFDM →

розділені на RU: 26-tone, 52-tone, 106-tone, 242-tone.

Формула ефективності:

$$\eta_{OFDMA} = \frac{\sum_{i=1}^{N} R_i}{R_{total}},$$

ідеальні значення > 80 %.

2. MU-MIMO UL/DL

Навантаження ділиться між клієнтами:

$$C_{MU} = m \cdot C_{SU},$$

де m — кількість одночасно обслуговуваних клієнтів.

3. BSS Coloring

Фрейми отримують “колір”, що дозволяє пристроям розрізняти:

кадри «своєї» мережі;

сусідні BSS.

Це зменшує інтерференцію та Backoff на 30–40 %.

4. TWT (Target Wake Time)

Зменшує навантаження на канал за рахунок планування “вікон активності”.

3.2.2. Використання Wi-Fi 7 (802.11be)

Wi-Fi 7 оптимізує ефективність завдяки:

320-МГц каналам

$[R \propto B,]$

тобто швидкість прямо пропорційна ширині каналу.

MLO (Multi-Link Operation)

Передача відбувається одночасно у 2.4, 5 та 6 ГГц:

$$C_{MLO} = \sum_{i=1}^{L} C_i$$

Це знижує затримку до 1–2 мс.

4096-QAM

36 % приросту спектральної ефективності проти 1024-QAM.

3.3. Методи зменшення інтерференції та підвищення стабільності зв’язку

Інтерференція — головний ворог Wi-Fi. Її мінімізація є центральним елементом оптимізації.

3.3.1. Вибір оптимальних каналів

У діапазоні 2.4 ГГц використовують лише канали 1, 6, 11, бо вони не перекриваються.

У діапазоні 5 ГГц:

24 канали по 20 МГц;

рекомендація — UNII-1 та UNII-3 через відсутність DFS.

3.3.2. Контроль потужності

Формула оптимального покриття:

$P_t = RSSI_{target} + PL(d) - G_t - G_r$

Зменшення потужності запобігає:

надлишковому перекриттю BSS;

Co-channel interference;

roaming-проблемам.

3.3.3. Використання 6-ГГц діапазону

Переваги:

немає завад;

59 каналів по 20 МГц;

критично низький шум.

3.4. Механізми керування трафіком та балансування навантаження

3.4.1. Load Balancing

Точка доступу рахує:

$$U = \frac{N_{clients}}{C_{AP}},$$

і перенаправляє клієнтів на інші AP.

3.4.2. Band Steering

Клієнтів з підтримкою 5/6 ГГц треба переміщувати з 2.4 ГГц.

3.4.3. Airtime Fairness

Забезпечує рівний доступ до ефіру:

$$T_i = \frac{1}{N},$$

де T_i — час клієнта.

Це не дозволяє повільним клієнтам “псувати” всю мережу.

3.5. Удосконалення параметрів безпеки Wi-Fi мереж

Безпека впливає на ефективність, і навпаки.

3.5.1. WPA3 та SAE

WPA3-SAE вводить стійкіший обмін ключами:

збільшується обчислювальне навантаження;

клієнти з малими CPU працюють повільніше.

3.5.2. PMF (Protected Management Frames)

Захищає від deauth-атак.

Зменшує кількість перепідключень — підвищує загальну стабільність.

3.5.3. Фільтрація кадрів управління

Захищає від broadcast-бурстів.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи було здійснено всебічний аналіз сучасних безпроводових Wi-Fi систем, їх архітектури, принципів функціонування та основних факторів, що впливають на ефективність передачі даних. Робота включала комплексне теоретичне дослідження стандартів сімейства IEEE 802.11, аналіз продуктивності реальних мереж та розробку системи рекомендацій щодо удосконалення та оптимізації Wi-Fi інфраструктури. На основі проведеного дослідження сформульовано такі узагальнені висновки.

1. Проведений аналіз теоретичних основ підтвердив, що ефективність Wi-Fi мережі визначається сукупною дією механізмів фізичного (PHY) і канального (MAC) рівнів. Основними факторами є використання модуляційних методів OFDM/OFDMA, технологій просторового мультиплексування MIMO та MU-MIMO, схем спрямованого формування променя (beamforming), а також алгоритмів доступу до середовища CSMA/CA, RTS/CTS та EDCA. Сучасні стандарти Wi-Fi 6/6E та Wi-Fi 7 значно розширюють можливості організації багатокористувацького доступу завдяки OFDMA, BSS Coloring, Target Wake Time та Multi-Link Operation.

2. У другому розділі було встановлено, що ключовими параметрами ефективності Wi-Fi мереж є: пропускна здатність, затримка, джиттер, співвідношення сигнал/шум, рівень завад, втрати пакетів та ефективність MAC-рівня. Реальна пропускна здатність становить лише 40–75 % від теоретичної швидкості PHY через накладні витрати службових фреймів, методи уникнення колізій та інтерференцію сусідніх BSS. Доведено, що інтерференція є головним фактором деградації продуктивності, особливо в діапазоні 2.4 ГГц. Було показано, що сучасні технології Wi-Fi 6 здатні зменшувати затримку в кілька разів, стабілізувати передачу малих пакетів для IoT та забезпечувати до чотирьох разів кращу ефективність у щільних середовищах порівняно з Wi-Fi 5.

3. Виконаний аналіз джерел інтерференції довів, що одночасна робота багатьох мереж у межах одного приміщення призводить до значного зниження SNR та збільшення частоти повторних передач. Особливо це помітно у мережах зі змішаними типами клієнтів, де слабкі пристрої з нижчими рівнями MCS визначають продуктивність усієї BSS. Високу завадостійкість забезпечують методи адаптивного вибору каналів, механізми автоматичного визначення ширини каналу, оптимізація потужності AP, а також застосування 6-гігагерцового спектра, який характеризується низьким рівнем шуму.

4. У третьому розділі було розроблено комплекс практичних та теоретично обґрунтованих рекомендацій з підвищення ефективності Wi-Fi мереж. Оптимізація розміщення точок доступу була показана як критично важлива умова для збалансованості покриття, мінімізації інтерференції та підвищення загальної пропускної здатності мережі. Застосування сучасних стандартів Wi-Fi 6/6E та Wi-Fi 7 дозволяє впровадити ефективний мультикористувацький доступ, забезпечити низькі затримки та менше навантаження на CSMA/CA. Зокрема:

OFDMA забезпечує одночасний доступ десятків клієнтів;

MU-MIMO підвищує просторову ефективність у downlink та uplink;

BSS Coloring зменшує вплив сусідніх мереж;

TWT забезпечує енергоефективність пристроїв IoT;

MLO Wi-Fi 7 дозволяє передавати дані одночасно у трьох діапазонах.

5. Аналіз впливу безпекових механізмів показав, що сучасні протоколи WPA3 та PMF збільшують надійність мережі, але потребують коректного впровадження, щоб уникнути надлишкових затримок та зайвого навантаження на слабкі клієнтські пристрої. Правильна оптимізація ключових операцій та використання апаратного прискорення дозволяють мінімізувати їх негативний вплив.

6. Загальний висновок роботи полягає в тому, що ефективність Wi-Fi мереж — це багатофакторна величина, яка залежить як від фізичних процесів поширення радіохвиль, так і від алгоритмів управління трафіком, характеристик трафіку, особливостей розгортання інфраструктури та параметрів клієнтських пристроїв. Найбільш суттєве підвищення ефективності досягається через комплексний підхід, який включає:

оптимальне проектування топології покриття;

використання сучасних технологій Wi-Fi 6/6E/7;

адаптивне управління каналами та потужністю;

застосування механізмів QoS;

впровадження інтелектуальних механізмів балансування навантаження;

використання алгоритмів прогнозування радіосередовища (AI/ML).

Проведене дослідження дозволило сформувати чітке розуміння того, які технічні рішення необхідні для побудови високопродуктивних, стабільних та масштабованих Wi-Fi систем нового покоління. Запропоновані рекомендації можуть бути використані під час проектування великих корпоративних мереж, домашніх систем, а також у середовищах високої щільності (бізнес-центри, навчальні заклади, транспортні вузли, стадіони, торгові центри тощо).