

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи поліпшення завадостійкості та  
збільшення швидкості передачі даних у Wi-Fi-мережах

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-22-6  
Юрченко Т.А.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Піскарьов О.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Системне програмування \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту \_\_\_\_\_ Юрченку Тарасу Андрійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Методи поліпшення завадостійкості та збільшення швидкості передачі даних у Wi-Fi-мережах \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від “ 01 ” квітня 2024 р. № 257 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 15 червня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи \_\_\_\_\_

1) аналіз стандартів та особливостей Wi-Fi-мереж \_\_\_\_\_

2) аналіз та дослідження методів поліпшення параметрів Wi-Fi-мереж \_\_\_\_\_

3) експериментальні дослідження запропонованих методів \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1) огляд джерел інформації за темою роботи; \_\_\_\_\_

2) аналіз предметної області; \_\_\_\_\_

3) вибір та обґрунтування методики дослідження; \_\_\_\_\_

4) проведення експериментальних досліджень; \_\_\_\_\_

5) висновки. \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Слайд-презентація – 22 слайди \_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд джерел за темою роботи	02.04.24 - 08.04. 24	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	09.04.24 - 16.04.24	
3	Вибір інструментальних засобів	17.04.24 - 22.04.24	
4	Розробка моделей	23.04.24 - 06.05.24	
5	Проведення експериментів	07.05.24 - 23.05.24	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	24.05.24-03.06.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	04.06.24- 07.06.24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	08.06.24- 12.06.24	

Дата видачі завдання 01 квітня 2024 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Піскар'єв О.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 85 с., 19 рис., 1 табл., 2 дод., 36 джерел.

СТАНДАРТИ IEEE 802.11, ФРАГМЕНТАЦІЯ ФРЕЙМІВ, КОДУВАННЯ, МОДУЛЯЦІЯ, ПЕРЕШКОДИ, МОДЕЛІ МАРКОВА, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ПРОСТОРОВО-ЧАСОВЕ КОДУВАННЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методів поліпшення завадостійкості та збільшення швидкості передачі даних у Wi-Fi-мережах з метою впровадження в існуючі системи та при проектуванні нових.

Пропонується використання двох методів. Метод вдосконалення Wi-Fi мереж з урахуванням електромагнітної сумісності (ЕМС), що дозволяє мінімізувати вплив внутрішніх та зовнішніх перешкод, й суттєво покращує завадостійкість та стабільність роботи мережі. Урахування ЕМС при проектуванні та експлуатації Wi-Fi мереж забезпечує більш високу якість зв'язку та знижує ймовірність втрат пакетів. Другий метод - просторово-часового кодування (ПЧК) має значні переваги в підвищенні завадостійкості та швидкості передачі даних й дозволяє використовувати спеціалізовані алгоритми та апаратні засоби й підвищує стійкість до завад, оскільки сигнали, передані через різні антени, досягають приймача по різних шляхах, що дозволяє компенсувати вплив перешкод і зменшити ймовірність втрати даних.

## ABSTRACT

Master's thesis: 85 pages, 19 figures, 2 tables, 2 appendices, 36 sources.

IEEE 802.11 STANDARDS, FRAME FRAGMENTATION, CODING, MODULATION, INTERFERENCE, MARKOV MODELS, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, SPACE-TIME CODING.

The purpose of the qualification work is to study methods for improving noise immunity and increasing data transmission speed in Wi-Fi networks for implementation in existing systems and in the design of new ones.

The following two methods are proposed to be used. The method of improving Wi-Fi networks with regard to electromagnetic compatibility (EMC), which minimizes the impact of internal and external interference and significantly improves the noise immunity and stability of the network. Taking EMC into account when designing and operating Wi-Fi networks ensures higher communication quality and reduces the likelihood of packet loss. The second method, space-time coding (STC), has significant advantages in improving noise immunity and data transmission rates and allows the use of specialized algorithms and hardware and increases resistance to interference, as signals transmitted through different antennas reach the receiver via different paths, which compensates for the effects of interference and reduces the likelihood of data loss.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП .....	8
1 АНАЛІЗ СТАНДАРТІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ WI-FI-МЕРЕЖ..	10
1.1 Аналіз бездротових комп'ютерних мереж .....	11
1.2 Структура та топології мережі WLAN .....	19
1.3 Проблеми та недоліки бездротових мереж .....	21
1.4 Особливості кодування та модуляція у Wi-Fi-мережах.....	28
2 МЕТОДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ WI-FI-МЕРЕЖ .....	34
2.1 Аналіз видів перешкод у WI-FI-мережах .....	34
2.2 Моделі типових видів перешкод .....	35
2.3 Визначення завад у Wi-Fi мережах .....	39
2.4 Метод вдосконалення Wi-Fi мережи з урахуванням ЕМС .....	46
2.5 Метод вдосконалення Wi-Fi мережи за допомогою ПЧК .....	53
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ.....	61
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	69
ДОДАТОК А ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....	73
ДОДАТОК Б ПУБЛІКАЦІЇ .....	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ  
І ТЕРМІНІВ

ПЧК – просторово-часове кодування

AP – точка доступу (англ., Access Point)

СКК – кодування з використанням комплементарних кодів (англ., Complementary Code Keying)

DSSS – технології розширення спектру методом прямої послідовності (англ., Direct Sequence Spread Spectrum)

IEEE – інститут інженерів з електротехніки і електроніки (англ., Institute of Electrical and Electronics Engineers)

FHSS – технології розширення спектру шляхом стрибкоподібної перебудови частоти (англ., Frequency Hopping Spread Spectrum)

MAC – протокол управління доступом до середовища передачі (англ., Medium Access Control)

QoS – якість обслуговування (англ., Quality of Service)

SSID – ідентифікатор зони обслуговування (англ., service set identifier)

WLAN – безпроводова локальна мережа (англ., Wireless LAN)

## ВСТУП

Бездротові мережі постійно розвиваються, щоб відповідати швидким змінам, з якими стикається телекомунікаційна галузь, й новим потребам користувачів, експоненціальному збільшенню трафіку мобільної передачі даних, кількості підключених пристроїв, електромагнітних перешкод, новим сценаріям використання. Сьогодні близько 15 мільярдів пристроїв у світі підключаються до Wi-Fi-мереж, що робить зростаючий обсяг трафіку серйозним викликом для майбутніх бездротових мереж [1]. Незліченна кількість додатків суттєво змінила наше уявлення та використання технологій у повсякденному житті, а Wi-Fi став одним із найуспішніших винаходів, визнаним на міжнародному рівні як значний прорив у галузі інформаційних технологій. Однією з причин впровадження Wi-Fi для внутрішньоофісних мереж є те, що обладнання, що працює за цими стандартами, не потребує отримання ліцензії. Переваги безпроводових комп'ютерних мереж стандартів IEEE 802.11 включають високу швидкість обміну даними, швидке й просте створення мережі, низьку вартість та різноманітність обладнання. Завдяки цим перевагам бездротові мережі широко використовуються для створення WLAN (Wireless Local Area Network) у будинках, громадських Hot-Spot мережах та для надання послуг корпоративним користувачам.

Незважаючи на впровадження нових та вдосконалених технологій, Wi-Fi-мережі залишаються вразливим. Зростання популярності WLAN призводить до збільшення кількості джерел перешкод у діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц. Для зменшення негативного впливу зазначених факторів на ефективність роботи WLAN застосовуються різні заходи, такі як раціональний розподіл робочих частот та введення частотних, регіональних та часових обмежень для радіоелектронних пристроїв.

Таким чином, актуальність цієї теми обумовлена кількома ключовими аспектами:

1. Зростання навантаження на мережі - кількість пристроїв, що підключаються до Wi-Fi, зростає експоненціально, що вимагає покращення продуктивності мереж та їх завадостійкості. У сучасних умовах висока щільність пристроїв може призводити до значних перешкод та зниження якості зв'язку.

2. Сучасні додатки вимагають стабільного високошвидкісного доступу до мережі й забезпечення таких вимог потребує використання нових технологій та методів, які можуть підвищити пропускну здатність та завадостійкість Wi-Fi-мереж.

3. Збільшення кількості бездротових мереж призводить до зростання проблем з інтерференцією. Висока щільність радіомереж створює необхідність удосконалення методів забезпечення ЕМС для підтримання стабільної роботи мереж.

4. Нові стандарти Wi-Fi, такі як Wi-Fi 6 (802.11ax) та майбутній Wi-Fi 7, пропонують нові можливості для підвищення продуктивності мереж. Однак, для максимальної реалізації цих можливостей необхідно впроваджувати нові методи, що покращують завадостійкість та швидкість передачі даних.

5. Поліпшення завадостійкості також сприяє підвищенню безпеки бездротових мереж, знижуючи ймовірність успішних атак на інфраструктуру.

6. Зниження енергоспоживання пристроїв є важливим фактором, особливо для акумуляторних пристроїв. Удосконалені методи передачі даних можуть сприяти зменшенню енергоспоживання та підвищенню часу автономної роботи пристроїв.

Отже, робота, спрямована на покращення ефективності функціонування Wi-Fi-мереж ще на етапі проектування, є актуальною та своєчасною. Це дозволить підвищити надійність і продуктивність таких мереж.

## 1 АНАЛІЗ СТАНДАРТІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ WI-FI-МЕРЕЖ

Бездротові мережі зазвичай класифікують за різними критеріями, такими як тип середовища передавання, спосіб з'єднання, метод доступу до мережі, тип модуляції тощо. Проте, однією з найпоширеніших класифікацій є поділ за територіальною ознакою (рисунок 1.1), яка відображає розташування пристроїв у просторі та їх взаємозв'язок.

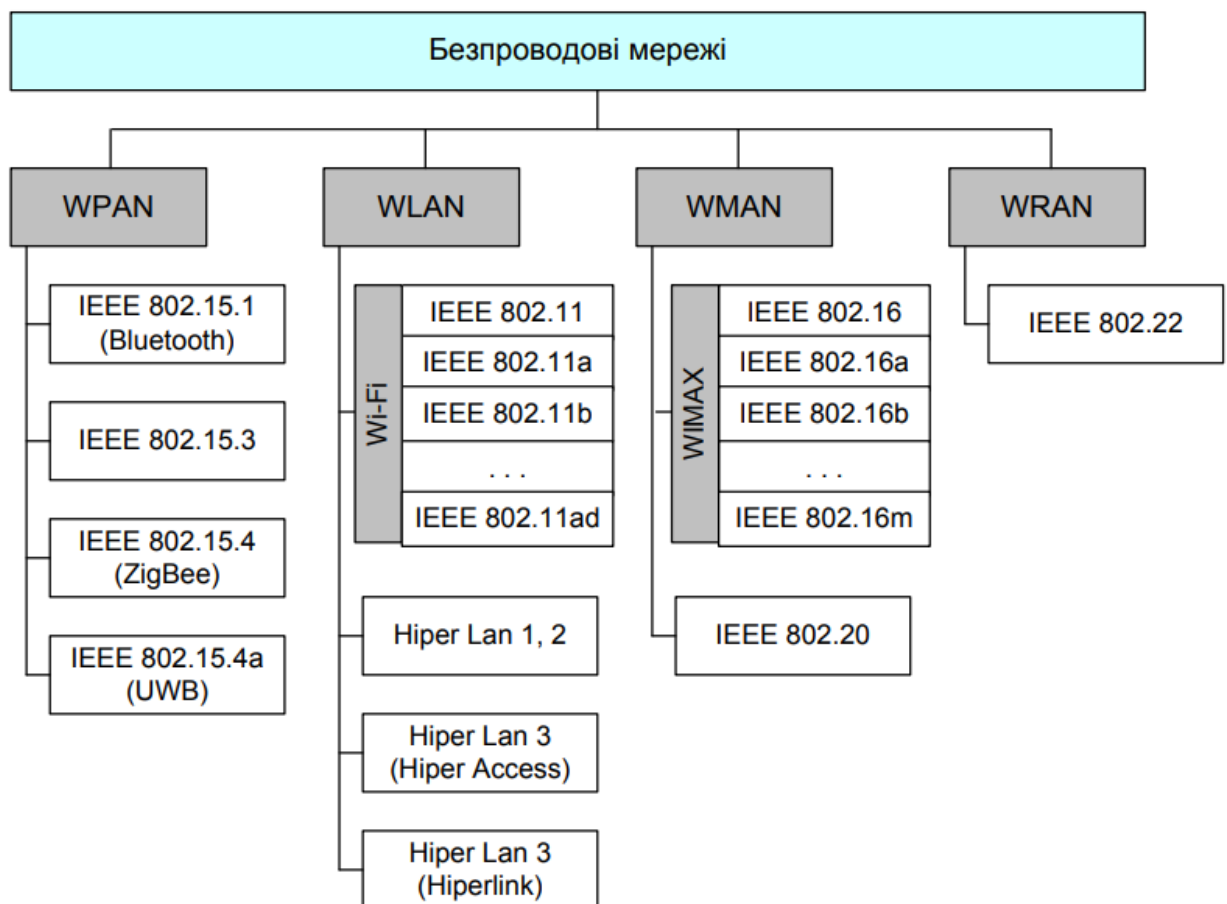


Рисунок 1.1 – Класифікація бездротових комп'ютерних мереж

Бездротові Wi-Fi-мережі (стандарт IEEE 802.11), наразі набувають все більшого поширення у сучасному світі завдяки своїй простоті розгортання, відносно низькій вартості та зручності у використанні [2]. Ці фактори

сприяють постійному зростанню кількості WLAN, що призводить до збільшення щільності радіомереж. Зі збільшенням кількості пристроїв, що підключаються до Wi-Fi-мереж, та зростанням вимог до якості обслуговування, особливо в умовах високої щільності, виникає необхідність удосконалення методів забезпечення завадостійкості та підвищення швидкості передачі даних. Мережі Wi-Fi використовуються не лише для доступу до Інтернету, але й для різних додатків, таких як відеоконференції, потокове відео високої роздільної здатності, онлайн-ігри та хмарні сервіси, що потребують високої пропускної здатності та низької затримки.

Для визначення шляхів вдосконалення необхідно провести аналіз області застосування, технології та принципи роботи бездротових комп'ютерних мереж. Виявити проблеми, що виникають при проектуванні WLAN, а також розглянути методи, що використовуються для вирішення проблем в бездротових комп'ютерних мережах.

### 1.1 Аналіз бездротових комп'ютерних мереж

У розвитку бездротових локальних мереж (WLAN) ключову роль відіграють три основні організації зі стандартизації: Wi-Fi Alliance, Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), і Європейський інститут стандартів з телекомунікацій (ETSI). Кожна з цих організацій вносить свій унікальний вклад у формування і вдосконалення стандартів, що забезпечують ефективну роботу WLAN.

IEEE, як некомерційне професійне об'єднання, займається розробкою міжнародних стандартів, включаючи відомий стандарт IEEE 802.11, який визначає основні параметри для бездротових локальних мереж [2]. Ці стандарти є основою для розробки та впровадження технологій Wi-Fi у всьому світі. Стандарти IEEE 802.11, наприклад, включають різні специфікації, які постійно оновлюються для покращення швидкості передачі даних, завадостійкості, енергоефективності та безпеки мереж.

Wi-Fi Alliance, створений як некомерційна міжнародна організація [3], зосереджена на сертифікації пристроїв, які відповідають стандартам IEEE. Ця сертифікація гарантує сумісність різних пристроїв від різних виробників, що є критично важливим для споживачів і підприємств. Програми сертифікації Wi-Fi Alliance, такі як Wi-Fi 6 та Wi-Fi 6E, забезпечують поліпшену продуктивність і знижене енергоспоживання, що особливо важливо в умовах сучасних високошвидкісних мереж.

ETSI, це ще одна некомерційна організація, з моменту свого заснування у 1988 році працює над створенням стандартів для телекомунікаційних систем у Європі [4]. ETSI допомагає забезпечити узгодженість і взаємодію різних технологічних рішень на європейському ринку. Щодо WLAN, ETSI співпрацює з IEEE для забезпечення відповідності європейських стандартів міжнародним вимогам, що сприяє глобальній інтеграції та гармонізації телекомунікаційних систем.

Спільні зусилля цих організацій спрямовані на постійне покращення і стандартизацію технологій WLAN. Це включає в себе розробку нових стандартів, які враховують зростаючі вимоги до швидкості передачі даних, зменшення затримок, підвищення завадостійкості, енергоефективності та забезпечення безпеки мереж. Інновації в стандартах, такі як використання більш широких діапазонів частот і поліпшення методів модуляції, дозволяють мережам WLAN підтримувати все більшу кількість пристроїв і обсягів даних, що є критично важливим у сучасному світі Інтернету речей (IoT) та інтенсивного використання мобільних пристроїв.

Таким чином, робота Wi-Fi Alliance, IEEE та ETSI є фундаментальною для розвитку та підтримки сучасних і майбутніх бездротових мереж, забезпечуючи стабільність, сумісність і високу якість зв'язку.

Механізми роботи та вимоги до пристроїв для бездротової передачі даних описуються стандартом IEEE 802.11 та його більш пізнішими розширеннями. Ці стандарти регламентують діапазони частот, швидкості передачі, методи кодування інформації та інші технологічні характеристики

роботи мережі. Головною відмінністю розширень стандартів a, b і g є фізичний рівень. Основне призначення фізичних рівнів стандарту IEEE 802.11 полягає у забезпеченні механізмів бездротової передачі для підрівня MAC (Medium Access Control), а також підтримці виконання вторинних функцій, таких як оцінка стану бездротового середовища передачі і повідомлення про це підрівню MAC. Набір стандартів IEEE 802.11 визначає ряд технологій реалізації фізичного рівня, які можуть бути використані підрівнем IEEE 802.11 MAC.

Фізичний рівень стандартів IEEE 802.11a, b, g забезпечує різні підходи до модуляції та кодування, що дозволяє досягати різних швидкостей передачі даних і рівнів завадостійкості. Інститут IEEE продовжує роботу над створенням нових специфікацій протоколу зв'язку в бездротових комп'ютерних мережах (WLAN). Завдяки використанню одночасно декількох частотних каналів, пристрої стандартів IEEE 802.11n, ac, ah працюють значно швидше, ніж обладнання стандартів g і a. Наприклад, стандарт IEEE 802.11n, введений у 2009 році, використовує технологію MIMO (Multiple Input Multiple Output), що дозволяє досягати швидкості передачі даних до 600 Мбіт/с. Стандарт IEEE 802.11ac, прийнятий у 2013 році, ще більше покращує продуктивність завдяки використанню ширших каналів (до 160 МГц), кількох просторових потоків і технології MU-MIMO (Multi-User MIMO), що дозволяє досягати швидкості передачі даних до 1 Гбіт/с і більше. Найновіший стандарт IEEE 802.11ah, також відомий як Wi-Fi 6, запроваджений у 2019 році, включає додаткові вдосконалення, такі як OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) і Target Wake Time (TWT), що значно підвищує ефективність використання спектра та знижує енергоспоживання, дозволяючи досягати швидкості передачі даних до 10 Гбіт/с.

Таким чином, постійний розвиток стандартів IEEE 802.11 дозволяє вирішувати зростаючі потреби у швидкості та надійності бездротових мереж, забезпечуючи ефективну передачу даних і високу завадостійкість. Ці вдосконалення є критично важливими для підтримки сучасних вимог до

бездротових мереж, таких як підключення великої кількості пристроїв в умовах обмеженого спектра, а також забезпечення високої якості обслуговування для таких застосувань, як потокове відео, онлайн-ігри та Інтернет речей (IoT).

Базовий стандарт IEEE 802.11 [2], визначає протоколи, необхідні для організації бездротових комп'ютерних мереж (WLAN). Перший протокол передбачає передачу сигналів по радіоканалах у діапазоні 2,4 ГГц за допомогою технології розширення спектру методом прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS). Ця технологія забезпечує більш надійний захист від перешкод і покращує якість зв'язку, поширюючи сигнал на більш широкий діапазон частот. Другий протокол використовує передачу сигналів по радіоканалах у діапазоні 2,4 ГГц за допомогою технології розширення спектру шляхом стрибкоподібної перебудови частоти (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Ця технологія покращує стійкість до перешкод і забезпечує надійність передачі, часто змінюючи частоту передачі сигналу відповідно до певного алгоритму.

Третій протокол використовує інфрачервоне випромінювання для передачі сигналів. Хоча ця технологія обмежена лінією видимості і не проходить крізь стіни, вона може бути ефективною в деяких специфічних випадках, наприклад, для зв'язку в межах однієї кімнати або для пристроїв, що потребують високої безпеки даних.

Стандарти IEEE 802.11 постійно розвиваються, щоб відповідати новим вимогам і технологічним досягненням (рисунок 1.2). Нові розширення, такі як IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, а також сучасні IEEE 802.11n, IEEE 802.11ac і IEEE 802.11ax, включають покращення, спрямовані на підвищення швидкості передачі даних, збільшення завадостійкості та ефективності використання спектру. Це дозволяє задовольняти потреби сучасних бездротових мереж у підвищеній пропускній здатності та надійності.

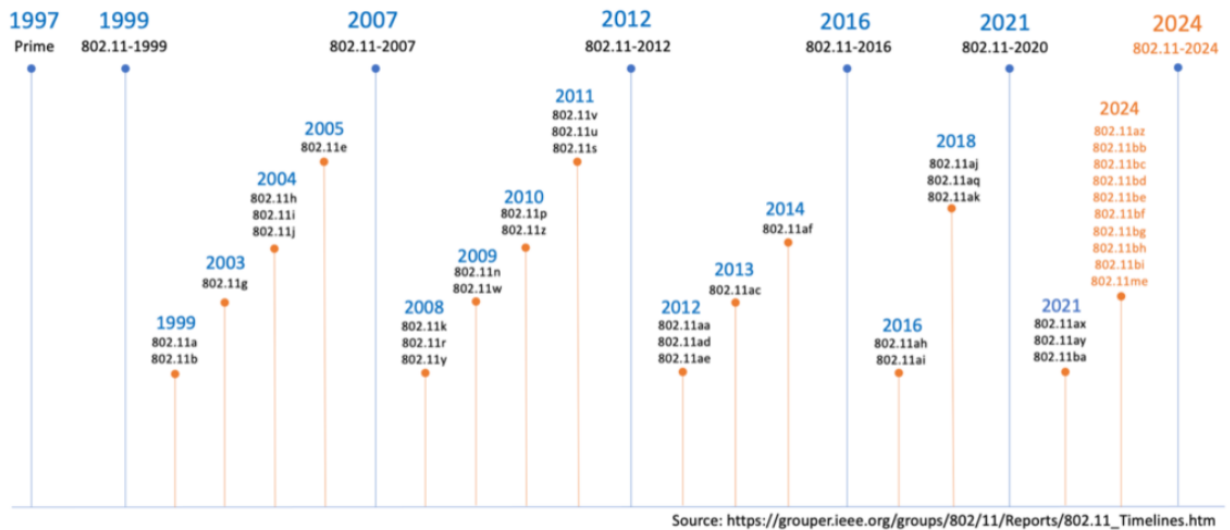


Рисунок 1.2 – Розвиток стандарту IEEE 802.11

З перерахованих технологій для дослідження Wi-Fi-мереж буде використовуватись технологія Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), яка обрана через її здатність забезпечувати надійний і стійкий до перешкод зв'язок завдяки розширенню спектру сигналу. Технологія DSSS підтримує передачу даних зі швидкістю 1 Мбіт/с при використанні двійкової відносної фазової маніпуляції (DBPSK) і 2 Мбіт/с при використанні квадратурної фазової маніпуляції (QPSK). Стандарт IEEE 802.11 визначає 14 частотних каналів, кожен з яких має ширину 22 МГц, причому три з них є неперекриваючимися [2 - 4], що дозволяє уникнути взаємних перешкод при налаштуванні мереж.

Стандарт IEEE 802.11a, опублікований у 1999 році, передбачає швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. Цей стандарт працює в діапазонах U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) 5,15-5,25 ГГц, 5,25-5,35 ГГц і 5,725-5,825 ГГц. У живленні пристроїв, що працюють на частотах 5,725-5,825 ГГц, відсутні обмеження стандарту і вони в основному використовуються для побудови розподілених бездротових мереж. IEEE 802.11a використовує канали шириною 20 МГц та визначає по чотири канали для кожного з трьох діапазонів. Для модуляції сигналу [7]. використовується ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), що дозволяє передавати корисний

сигнал одночасно на кількох частотах. Стандарт визначає три обов'язкові швидкості [8] - 6, 12 та 24 Мбіт/с, а також 5 необов'язкових - 9, 18, 36, 48 та 54 Мбіт/с.

Стандарт IEEE 802.11a має деякі недоліки, серед яких варто відзначити високе споживання потужності радіопередавачів у діапазоні 5 ГГц та обмежений радіус дії. Також важливо зазначити, що пристрої, сумісні з IEEE 802.11a, часто мають більш високу вартість порівняно з аналогічними пристроями для інших стандартів бездротових мереж.

Стандарт IEEE 802.11b, розширив можливості технології DSSS, впровадивши високошвидкісну технологію HR-DSSS (High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum). Ця технологія використовує діапазон ISM 2,4 ГГц та підтримує вищі швидкості передачі даних - 5,5 і 11 Мбіт/с. Як і в технології DSSS, HR-DSSS використовує схему організації каналів з шириною смуги частот 22 МГц, де з 14 каналів (рисунок 1.3 ) три є неперекриваючимися [8], що забезпечує стабільну та надійну передачу даних.

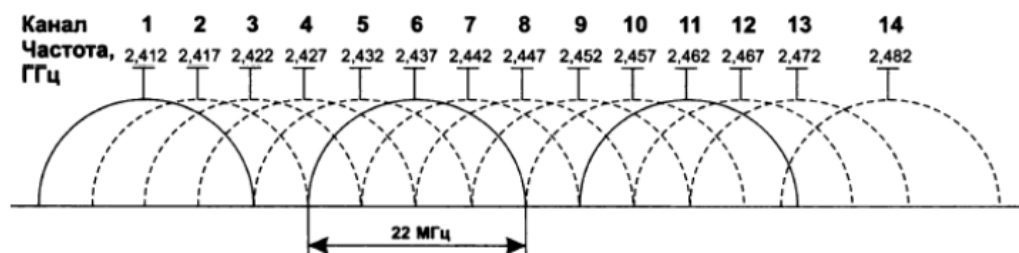


Рисунок 1.3 – Організація каналів у стандарті IEEE 802.11b

Вибір технології DSSS та її розширення HR-DSSS для дослідження обґрунтований їх здатністю забезпечувати високу якість зв'язку в умовах завад і перешкод, що робить їх оптимальними для побудови ефективних бездротових мереж. Ці технології дозволяють підтримувати стабільний і

швидкий зв'язок, що є важливим для сучасних безпроводових мереж, особливо в умовах високої щільності радіомереж і значної кількості користувачів.

Фізичний рівень стандарту IEEE 802.11b, що входить до складу WLAN стандарту IEEE 802.11, сумісний з попередніми версіями. Для передачі інформації використовуються різні методи кодування, включаючи комплементарні коди (ССК) та двійкове пакетне згорткове кодування (PBCC). Дані передаються із використанням модуляції, такої як ССК або PBCC [8], на швидкостях 5,5 або 11 Мбіт/с, у той час як для заголовків використовується DSSS на швидкості 1 Мбіт/с.

Стандарт IEEE 802.11g [9] описує роботу бездротових мереж WLAN у частотному діапазоні 2,4 ГГц та може досягати максимальної швидкості передачі даних до 54 Мбіт/с. Обов'язковими швидкостями передачі є 1, 2, 5,5, 6, 11, 12 і 24 Мбіт/с, тоді як 9, 18, 36, 48 і 54 Мбіт/с є опціональними. Цей стандарт є еволюційним продовженням IEEE 802.11b та сумісним з ним. Він має низьке споживання потужності, великий радіус дії (рисунок 1.4) та високу проникливість сигналу.

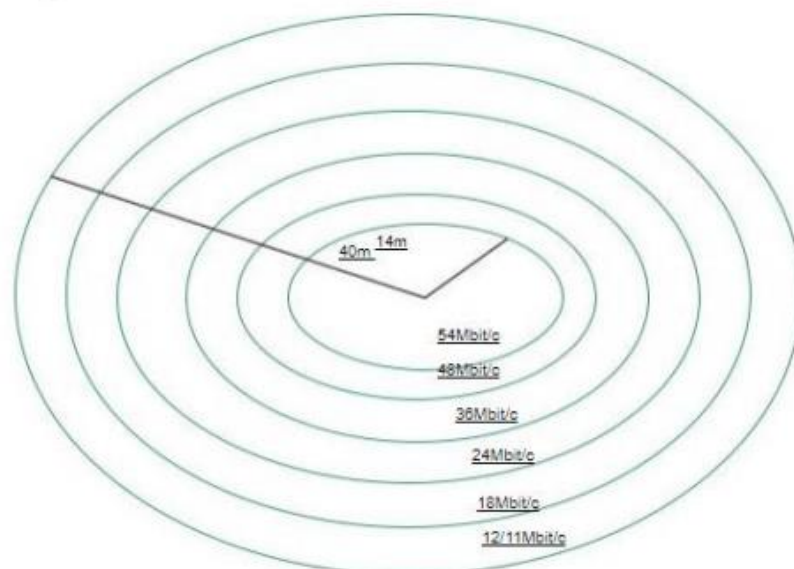


Рисунок 1.4 – Радіус дії бездротової мережі у частотному діапазоні 2,4 ГГц

Також цей стандарт є менш вартісним у порівнянні з IEEE 802.11a, оскільки пристрої низької частоти простіше виготовляти. Стандарт використовує як схему DSSS, так і OFDM-модуляцію. При розробці IEEE 802.11g розглядалися дві конкуруючі технології: OFDM і RBCC [10], що призвело до використання обох методів як базових та опціональних. У мережі, де працюють тільки пристрої стандарту IEEE 802.11g, передача відбувається з максимальною можливою швидкістю. Однак, у разі, якщо до мережі підключаються пристрої IEEE 802.11b, передача даних відбувається на швидкості стандарту 802.11b, щоб забезпечити сумісність, а інформація у заголовках повинна передаватися зі швидкостями стандарту IEEE 802.11b – як показано на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Формати заголовків при різному кодування

Технологія RBCC кодування може застосовуватися на швидкостях 5,5, 11, 22 і 33 Мбіт/с. Обов'язковими є швидкості 5,5 та 11 Мбіт/с, тоді як 22 та 33 Мбіт/с є опціональними.

## 1.2 Структура та топології мережі WLAN

Стандарт IEEE 802.11 ґрунтується на структурі стільникової мережі, де мережа може складатися з одного або декількох стільників. Кожен стільник керується базовою станцією, що називається точкою доступу (AP). У багатостільниковій мережі точки доступу взаємодіють через розподільну систему (DS), аналогічну магістральному сегменту кабельних ліній. Вся ця інфраструктура [8, 9], що складається з точок доступу і розподільної системи, формує розширену зону обслуговування (ESS). Крім того, стандарт передбачає одностільниковий варіант бездротової мережі, який може існувати без точок доступу (IBSS). У такому варіанті деякі функції можуть виконуватися безпосередньо робочими станціями.

Мережі стандарту IEEE 802.11 можуть використовувати (рисунок 1.6) три види топологій [2, 8]: незалежні базові зони обслуговування (IBSS) - відсутня точка доступу; базові зони обслуговування (BSS) - використовується одна точка доступу, підключена до розподільної системи; розширені зони обслуговування (ESS) - точки доступу з'єднані через розподільну систему.

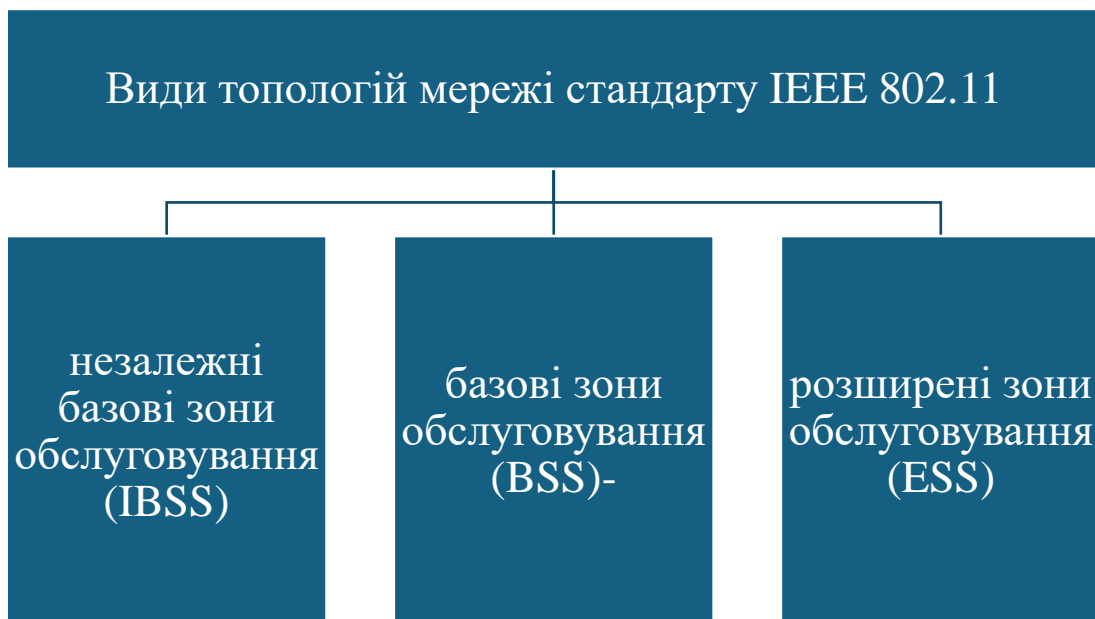


Рисунок 1.6 – Види топологій мережі стандарту IEEE 802.11

Зона обслуговування (service set) – це група пристроїв, логічно зібраних разом. Приймаюча станція може отримувати сигнали на різних частотних каналах. Передавальна станція спочатку передає ідентифікатор зони обслуговування (SSID). Станція-приймач використовує SSID для фільтрації отриманих сигналів і визначення, який з них їй потрібен. Wi-Fi-мережі розгортаються у приміщеннях, де потрібно забезпечити мобільність користувачів всередині будівлі, для тимчасових мереж на виставках чи конференціях, а також у випадках, коли прокладання кабельної мережі є складним, дорогим або взагалі неможливим. Вони також корисні, коли потрібно ввести мережу в експлуатацію протягом короткого часу. Крім того, такі системи дозволяють співробітникам мати постійний доступ до корпоративних ресурсів, навіть якщо вони не знаходяться біля робочого столу. Крім того, бездротове підключення є зручним для співробітників, які подорожують або не мають постійного робочого місця [11].

Наявність бездротових мереж у торгових закладах та складах стає ключовим фактором для підвищення ефективності управління запасами та відслідковуванням руху товарів. Завдяки бездротовим зчитувачам штрих-кодів можна миттєво оновлювати дані в базі даних щодо руху товарів. Підключення POS-терміналів до мережі дозволяє отримувати дані про продажі та стан запасів у реальному часі, що полегшує управління магазином.

Проте проектування та розгортання Wi-Fi-мереж у внутрішніх приміщеннях викликає певні труднощі через вплив перешкод, таких як стіни та перекриття, на якість сигналу. Сучасні технології вирішують цю проблему шляхом застосування спеціальних методів. Наприклад, технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) та багатопотокові системи дозволяють поліпшити якість сигналу та забезпечити кращу покриття мережі всередині будівлі. Крім того, розробляються алгоритми автоматичного вибору оптимальних параметрів мережі для максимально ефективного використання доступного спектру та мінімізації взаємних перешкод між пристроями.

### 1.3 Проблеми та недоліки бездротових мереж

Бездротові мережі мають свої проблеми та недоліки. Одна з основних проблем – це обмежене покриття бездротового сигналу, особливо в зонах з великою концентрацією металевих або бетонних конструкцій. Також, безпека є серйозною проблемою, оскільки бездротовий сигнал легко може бути перехоплений і використаний зловмисниками для несанкціонованого доступу до мережі. Додатковою проблемою є інтерференція від інших бездротових пристроїв, яка може призвести до зниження швидкості передачі даних та надійності зв'язку. Нарешті, бездротові мережі часто вимагають складнішого налаштування та підтримки порівняно з проводовими мережами, що може збільшувати витрати на підтримку та обслуговування.

Вбудовані механізми бездротових мереж (WLAN) забезпечують оптимальну роботу обмеженої кількості пристроїв всередині одного стільника. Однак зі зростанням кількості користувачів виникають нові виклики. Наприклад, збільшується взаємне перешкоджання між пристроями, що може призводити до частіших колізій та потреби у повторній передачі даних. Це, в свою чергу, призводить до збільшення часу доступу до мережі та затримок у передачі інформації. Таким чином, проблема ефективного доступу до мережі стає ще більш актуальною в сучасному світі бездротових технологій [12].

У бездротових мережах існує можливість такої ситуації: дві станції, позначені як А і В, розташовані поза зоною видимості одна для одної. Станція С може спілкуватися як зі станцією А, так і зі станцією В. Якщо станція А починає передачу даних на станцію С, станція В, не бачачи активності станції А через відсутність зв'язку, може також почати передавати дані. Однак через відсутність спілкування між станціями А і В обидва сигнали можуть одночасно досягти станції С, що призводить до колізії. Цей сценарій відомий як проблема прихованого вузла [13].

У бездротових мережах, які використовують стандарти IEEE 802.11b і g, кількість каналів, що не перекриваються, обмежена лише 3. Якщо мережа

складається лише з 1-3 стільників, рівень внутрішньосистемних перешкод є відносно низьким. Однак у випадку бездротових мереж, що мають чотири або більше стільників, точки доступу і мережеві контролери, розташовані в сусідніх стільниках і працюють на перекриваючихся частотних каналах, спричиняють значні взаємні перешкоди. Це може призвести до погіршення якості зв'язку, зменшення пропускної здатності та збільшення часу доступу до мережі. У крайньому випадку це може призвести до повної непрацездатності мережі [14].

Важливо враховувати взаємні перешкоди з іншими радіопристроями, які діють на тій самій території, такими як мікрохвильові печі, інші бездротові мережі та пристрої Bluetooth. Від інтенсивності випромінювання цих пристроїв залежить, наскільки суттєво може вплинути це на погіршення зв'язку або навіть на повну непрацездатність мережі [5, 15].

Механізми QoS стандарту IEEE 802.11e спрямовані на захист чутливого до затримок трафіку, такого як голос та відео, від інших додатків, які використовують безпроводове середовище передачі. Однак вони не забезпечують захисту від змін в середовищі передачі даних. Зі збільшенням кількості користувачів мережі та наявності зовнішніх і внутрішньосистемних перешкод, може відбуватися неконтрольоване зростання колізій та повторних передач пакетів. Це в свою чергу може призвести до збільшення часу доступу до мережі та зменшення доступної смуги пропускання. У результаті ефективність механізмів QoS може знизитися або їх робота може бути повністю блокована [15].

Проблеми ЕМС, як внутрішньосистемні, так і міжсистемні, вирішуються на рівні проектування обладнання безпроводової мережі. Наприклад, різні методи кодування можуть використовуватися для підвищення стійкості сигналу та мінімізації впливу електромагнітних перешкод. При проектуванні самої безпроводової мережі також приділяється увага вирішенню проблем ЕМС. В цьому випадку, можливості, які вбудовані в технічні засоби,

визначають можливості проектувальника мережі у врахуванні та уникненні електромагнітних конфліктів [16].

Механізми доступу до середовища передачі, що застосовуються в мережах стандарту IEEE 802.11 використовують механізм, відомий як "множинний доступ з контролем несучої та запобіганням колізій" (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA). Він базується на ідеї "прослуховування перед передачею" (listen before talk, LBT). Передавальна станція перевіряє, чи є в середовищі сигнал несучої, і перед початком передачі очікує його вільного стану [16]. Запобігання колізіям є критичним аспектом для бездротових мереж, оскільки вони не мають вбудованих механізмів для виявлення колізій. У випадку використання технології CSMA/CA колізія виявляється лише у випадку, якщо передавальна станція не отримала очікуваного підтвердження [16]. Механізм CSMA/CA, що використовується в бездротових мережах IEEE 802.11, включає кілька компонентів, які допомагають узгоджувати доступ до передавального середовища:

- контроль несучої це коли перед передачею даних вузли перевіряють, чи присутня несуча на каналі й допомагає уникнути колізій і забезпечує ефективно використання каналу;

- розподілена функція координації (DCF) полягає в тому, що кожен вузол мережі самостійно визначає час своєї передачі, враховуючи активність інших вузлів у мережі;

- фрейми підтвердження, що після успішного прийому даних може надіслати вузол, й який підтверджує успішну передачу або інформує про необхідність повторної передачі;

- механізм "готовність до передачі/готовність до прийому" (RTS/CTS), це коли перед відправкою даних вузли можуть обмінюватися спеціальними фреймами RTS і CTS для резервування каналу та уникнення колізій.

Ці компоненти допомагають забезпечити ефективний та надійний доступ до передавального середовища у Wi-Fi-мережах.

Згідно зі специфікацією IEEE 802.11, приймаюча станція повинна передати станції-відправнику фрейм підтвердження. Якщо передавальна станція не отримує фрейм підтвердження, вона вважає, що в середовищі передачі відбулася колізія. У такому випадку передавальна станція оновлює значення свого лічильника числа спроб, подвоює ширину вікна конкуренції і розпочинає процес доступу до середовища передачі спочатку [5,16]. На рисунку 1.7 зображено алгоритм отримання доступу до середовища передачі з використанням розподіленої функції координації (DCF) [5, 10, 12].

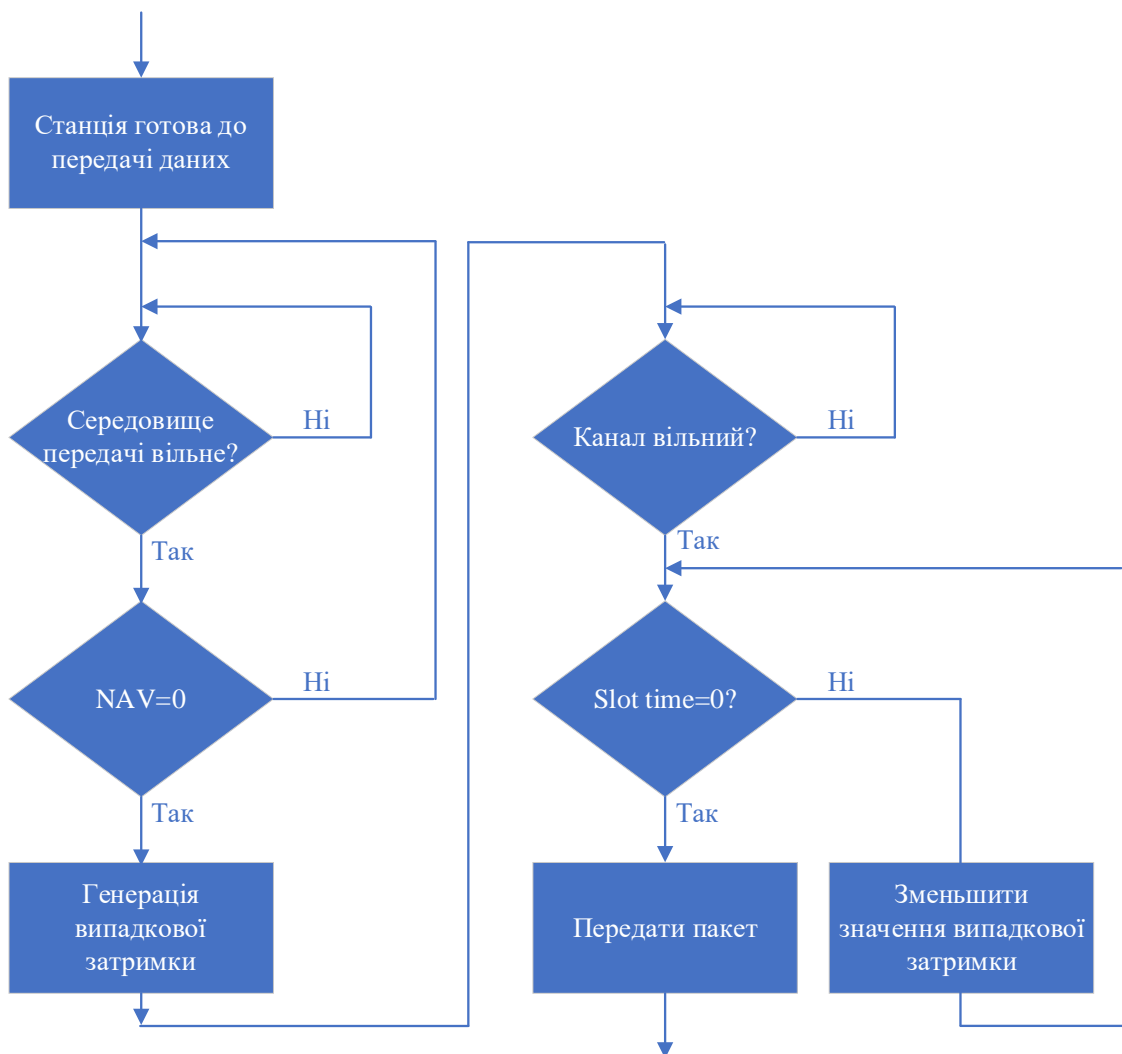


Рисунок 1.7 – Алгоритм передачі даних з використанням розподіленої функції координації DCF

У безпроводових мережах стандарту IEEE 802.11 проблема прихованого вузла вирішується за допомогою спеціального керуючого фрейму, який називається фрейм RTS (фрейм готовності до передачі). Фрейм RTS, що містить час, необхідний для обміну фреймами, надсилається до точки доступу.

Точка доступу отримує фрейм RTS від станції і відповідає керуючим фреймом CTS (фреймом готовності до прийому). Останній також містить поле тривалості, значення якого досить для того, щоб передавальна станція могла завершити обмін фреймами. Обмін фреймами включає той фрейм, який станція має намір передати, а також очікуваний нею фрейм підтвердження. Всі станції, що знаходяться в зоні дії точки доступу отримують фрейм CTS і оновлюють значення своїх NAV (векторів розподілу мережі).

Фрейм RTS, початковий сигнал передачі даних, проходить через процедуру DCF так само, як будь-який інший фрейм. Також, аналогічно кадрю підтвердження, відповідний фрейм CTS, який передається точкою доступу, пройде процедуру випадкової затримки і очікуватиме протягом інтервалу SIFS перед передачею.

Станція, яка отримала фрейм, підтверджує його безпомилковий прийом відправкою фрейма підтвердження. Фрейми підтвердження не беруть участь у процесі випадкової затримки, що забезпечує приймаючій станції кращий шанс отримати доступ до середовища передачі. При кожній неуспішній спробі доступу до середовища станція збільшує значення лічильника спроб. Коли значення лічильника спроб досягає встановленого порогу адміністратором мережі, станція спробує зарезервувати середовище [5, 14].

Фрагментація фрейму - це функція на рівні MAC, яка розбиває фрейм на менші частини для підвищення надійності передачі через безпроводове середовище. Кожен фрагмент передається окремо, а отримання кожного з них підтверджується індивідуально. Це означає, що у разі помилки або колізії потрібно буде передавати лише пошкоджений фрагмент, а не весь фрейм, що позитивно впливає на пропускну здатність.

Фрагментація також призводить до збільшення кількості службових сигналів і зменшення частки переданих корисних даних. Розмір фрагмента може бути встановлений адміністратором мережі, а фрагментації піддаються лише одноадресні фрейми. Широкомовні і багатоадресні фрейми передаються цілком, а фрагменти фрейма передаються пакетом, використовуючи лише один цикл механізму доступу до середовища передачі DCF.

PCF (Point Coordination Function) – це додатковий механізм доступу до середовища передачі, який може використовуватися разом з DCF (Distributed Coordination Function). PCF дозволяє передачу фреймів за допомогою опитування, що обмежує вільний доступ до середовища передачі. Проте, для роботи PCF необхідна інфраструктура BSS (Basic Service Set).

Багато виробників не надають підтримку PCF у своїх пристроях через те, що він призводить до збільшення кількості переданих службових сигналів в BSS. Такий підхід може бути обумовлений стратегією виробника або технічними обмеженнями.

Механізм PCF ґрунтується на взаємодії між точкою координації (PC) і станціями, які можуть бути опитані (CF-Pollable stations). У режимі роботи, керованому механізмом PCF, станції можуть передавати дані (по одному фрейму за раз), лише коли точка координації звертається до них із запитом. Точка координації має можливість відправляти фрейми станціям, запитувати їх щодо передачі фреймів, підтверджувати прийом фреймів згідно з вимогами MAC-рівня або завершувати сесію CFP.

Фрагментація фреймів може ефективно збільшити надійність передачі даних в бездротових мережах. Й, відповідно, відсутність фрагментації може призвести до того, що великі фрейми будуть передаватися повторно у випадку, якщо один фрагмент був пошкоджений або втрачений. Фрагментація дозволяє передавати лише пошкоджені або втрачені фрагменти, замість повного фрейму, що зменшує час передачі та збільшує надійність передачі в умовах перешкод. Втім, варто враховувати, що фрагментація призводить до збільшення обсягу службової інформації, що передається, що може знизити

доступну пропускну здатність мережі. Також важливо пам'ятати, що фрагментація може бути корисною у ситуаціях великого навантаження мережі або в умовах перешкод, але може бути менш ефективною в інших сценаріях.

Щодо механізмів протидії радіоперешкодам, фрейми підтвердження і фрагментація є досить ефективними. Однак, варто розуміти, що інші механізми можуть бути менш ефективними у боротьбі з перешкодами, особливо тими, що виникають на міжсистемному рівні або внаслідок взаємодії з сусідніми мережами.

Стандарт IEEE 802.11e вирішує завдання забезпечення якості обслуговування (QoS) у безпроводових мережах, що є важливим для передачі даних з вимогами до пропускну здатності та затримок. Для забезпечення якості обслуговування в мережах стандарту IEEE 802.11 пропонується два рішення на рівні MAC-підрівня:

1. Гібридна функція координації (Hybrid Coordination Function, HCF) в режимі конкуренції – це рішення, відоме як розширена розподілена функція координації (Enhanced Distributed Coordination Function, EDCF), дозволяє різним типам трафіку конкурувати за доступ до передавального середовища на основі їхніх потреб у якості обслуговування й використовує схему обслуговування черг, де пріоритет передається більш важливим трафікам, таким як голосова або відеоінформація.

2. HCF в режимі послідовного доступу – цей підхід передбачає послідовну передачу даних в мережі, де пристрої здійснюють передачу відповідно до заздалегідь визначеної черги. Це забезпечує більшу деталізацію в управлінні доступом до мережі та можливість надання пріоритету конкретним типам трафіку в мережі.

Ефективне регулювання потужності випромінювання може допомогти забезпечити оптимальну продуктивність та стабільність бездротових мереж, особливо в умовах містких областей з великою концентрацією користувачів.

## 1.4 Особливості кодування та модуляція у Wi-Fi-мережах

Кодування – це технологія, що дозволяє передавати дані через зашумлені канали з високою швидкістю. Усі канали передачі даних піддаються впливу перешкод, що призводить до помилок, таких як спотворені біти. Щоб підвищити надійність передачі, кодування замінює оригінальні послідовності бітів на довші коди, які здатні виявляти та виправляти помилки. Довжина кодового обмеження, або *constraint length*, визначає кількість вихідних бітів на один вхідний біт, що проходить через систему. Коди також характеризуються ефективним ступенем кодування, який вказує на співвідношення вихідних бітів до вхідних. Коди з вищим ступенем кодування дозволяють передавати дані з більшою швидкістю, проте вони є більш вразливими до перешкод, що може знижувати надійність зв'язку в складних умовах. Сучасні системи бездротового зв'язку використовують різні методи кодування, такі як корекція помилок на основі повторюваних кодів і алгоритми, які динамічно змінюють ступінь кодування залежно від якості каналу, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю передачі даних і стійкістю до помилок [18].

Одним із ключових припущень, на яких базується механізм кодування, є те, що помилки під час передачі інформації є незалежними подіями. Проте, на практиці помилки часто відбуваються серіями. Для вирішення цієї проблеми використовується метод чергування, який розкидає біти блокових помилок, перетворюючи їх на більш незалежні. Метою чергування є розподіл сусідніх бітів шляхом розміщення між ними бітів з інших місць.

Під час кодування інформаційний біт, що подається у вигляді прямокутного імпульсу, розбивається на послідовність дрібніших імпульсів-чипів. Це значно розширює спектр сигналу, оскільки ширину спектра можна вважати зворотно пропорційною тривалості одного чіпа. Такі кодові послідовності називають шумоподібними кодами. Окрім розширення спектра сигналу, зменшується спектральна щільність енергії, розмазуючи енергію

сигналу по всьому спектру. Це робить результуючий сигнал подібним до шуму, ускладнюючи його відрізнення від природного шуму.

Однією з найбільш відомих послідовностей є код Баркера довжиною 11: 11100010010. Коди Баркера мають найкращі властивості шумоподібності серед відомих псевдовипадкових послідовностей. Для передачі одиничного і нульового символів повідомлення використовуються відповідно пряма і інверсна послідовності Баркера. У приймачі отриманий сигнал множиться на код Баркера, обчислюється кореляційна функція сигналу, в результаті чого він стає вузькосмуговим і фільтрується у вузькій смузі частот. Будь-яка вузькосмугова перешкода, яка потрапляє в смугу вихідного широкосмугового сигналу, після множення на код Баркера стає широкосмуговою, і в вузьку інформаційну смугу потрапляє лише частина перешкоди, потужність якої приблизно в 11 разів менша, ніж на вході приймача. Основний сенс використання коду Баркера полягає в тому, щоб гарантувати високу достовірність прийнятої інформації, передаючи сигнал на рівні перешкод.

Таким чином, при швидкості передачі 1 або 2 Мбіт/с енергія вузькосмугової перешкоди розподіляється по всьому спектру сигналу, і її рівень зменшується в 11 разів [18].

Використання ССК-кодів дозволяє кодувати 8 біт на один символ при швидкості 11 Мбіт/с і 4 біти на символ при швидкості 5,5 Мбіт/с. Ці кодові послідовності є 8-чиповими, і при швидкості передачі 11 Мбіт/с кодування 8 біт на символ відповідає символній швидкості 1,375 мільйона символів за секунду ( $11/8 = 1,375$ ). Аналогічна символна швидкість використовується і при швидкості передачі 5,5 Мбіт/с, оскільки в цьому випадку один символ кодує тільки 4 біти (таблиця 1.1) [5].

Для забезпечення достовірності отриманих даних у режимах передачі за технологією OFDM використовують додавання надлишкової інформації та згорткове кодування. Суть згорткового кодування полягає в тому, що до послідовності переданих бітів додаються службові біти, значення яких залежать від кількох попередніх переданих бітів. Це дозволяє виявляти і

виправляти помилки, що виникають під час передачі даних. Незалежно від типу модуляції, у стандартах використовуються різні швидкості передачі, що дозволяє адаптуватися до умов каналу.

Таблиця 1.1. Швидкості передачі і тип модуляції в стандарті IEEE 802.11b

Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Кодова послідовність	Тип модуляції	Символьна швидкість, симв/сек.	Кількість біт на один символ
1	11-чіпова (код Баркера)	DBPSK	$10^6$	1
2	11-чіпова (код Баркера)	DQPSK	$10^6$	2
5,5	8-чіпова (ССК коди)	DQPSK	$1,375 \cdot 10^6$	4
11	8-чіпова (ССК коди)	DQPSK	$1,375 \cdot 10^6$	8

Технологія бінарного пакетного згорткового кодування (ВРКС) опціонально використовується в стандарті IEEE 802.11b для швидкостей 5,5 Мбіт/с і 11 Мбіт/с. В основі методу ВРКС лежить згорткове кодування зі швидкістю  $1/2$ , що означає, що на кожен переданий біт додається один службовий біт, удвічі збільшуючи обсяг переданих даних для забезпечення надійності передачі. Використовувані типи модуляції в ВРКС включають BPSK для швидкості 5,5 Мбіт/с та QPSK для швидкості 11 Мбіт/с, що дозволяє забезпечити високу швидкість передачі даних при збереженні стійкості до перешкод.

Для досягнення швидкостей 22 та 33 Мбіт/с у технології РВСС (розширений набір символів з модуляцією) використовується 8-позиційна фазова модуляція (8-PSK). Спочатку дані піддаються згортковому кодуванню з коефіцієнтом  $1/2$ , а потім до них застосовується пунктувальний кодер із

коефіцієнтами  $4/3 = 22$  Мбіт/с та  $2/1 = 33$  Мбіт/с. Пунктувальний кодер необхідний для зменшення надмірності переданої інформації. У результаті коефіцієнт кодування становить  $2/3$  для швидкості 22 Мбіт/с та 1 для швидкості 33 Мбіт/с.

У стандартах IEEE 802.11, включаючи 802.11b та 802.11g, важливо забезпечити достатньо високе відношення сигнал/перешкода для надійного зв'язку. Тип модуляції, який використовується, визначає, яке відношення сигнал/перешкода є прийнятним. Однак, виробники звичайно не надають такої інформації для обладнання WLAN.

Наприклад, у стандарті IEEE 802.11g, який використовує технологію OFDM, зменшення рівня сигналу при віддаленні від несучої на 16 і більше МГц має бути не менше 24 дБ, а при віддаленні на 30 і більше МГц - не менше 40 дБ. У таких умовах відношення сигнал/перешкода може досягати від -5 дБ до -11 дБ, в залежності від розташування.

При оцінці допустимого відношення сигнал/перешкода важливо враховувати не тільки вплив сусідніх каналів, але і ефекти перекриття. Наприклад, для забезпечення надійної роботи в режимі ССК зі швидкістю передачі 11 Мбіт/с виявлено, що відношення сигнал/шум мусить бути не менше 8,5 дБ, а в режимі РВСС – не менше 4,5 дБ.

В 2018 році Wi-Fi Alliance представила Wi-Fi 6, що ґрунтується на стандарті IEEE 802.11ax. Цей новий стандарт вніс ряд істотних поліпшень у бездротові мережі. Одним зі значущих змін став введений Wi-Fi Alliance новий підхід до найменування стандартів Wi-Fi, де Wi-Fi 6 означає найновіший стандарт, попередні версії позначаються як Wi-Fi 5 (відповідає 802.11ac) та Wi-Fi 4 (відповідає 802.11n). Це спрощує розуміння та ідентифікацію різних версій Wi-Fi для споживачів та фахівців. На рисунку 1.8 показано еволюцію збільшенні швидкості передачі даних зі зміною стандартів.

Впровадження стандарту Wi-Fi 6 (802.11ax) відкриває шлях до ряду переваг, особливо у ситуаціях високої щільності мережі та вимог до швидкості передачі даних (рисунок 1.9).

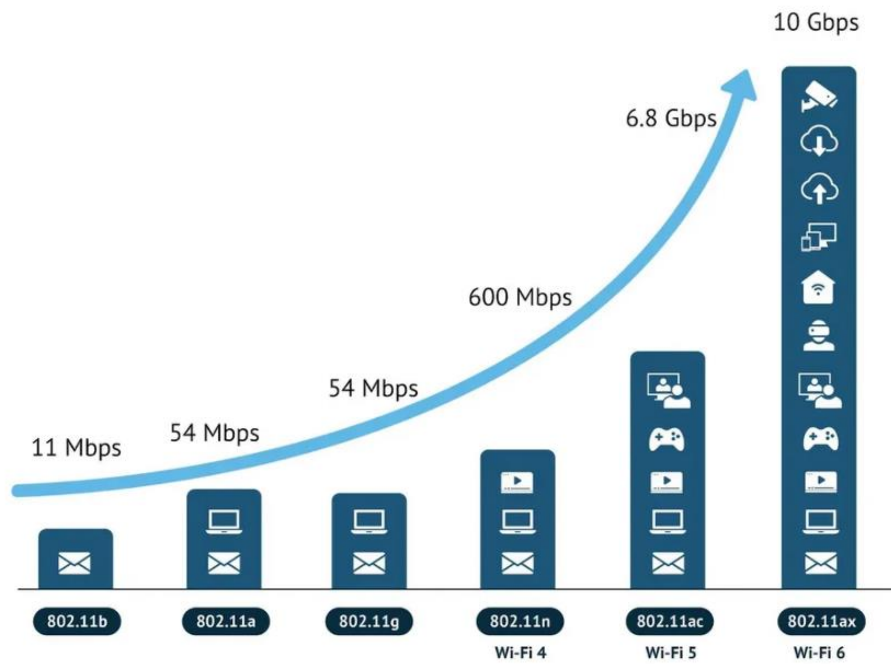


Рисунок 1.8 – Тенденція збільшення швидкості передачі даних зі зміною стандартів

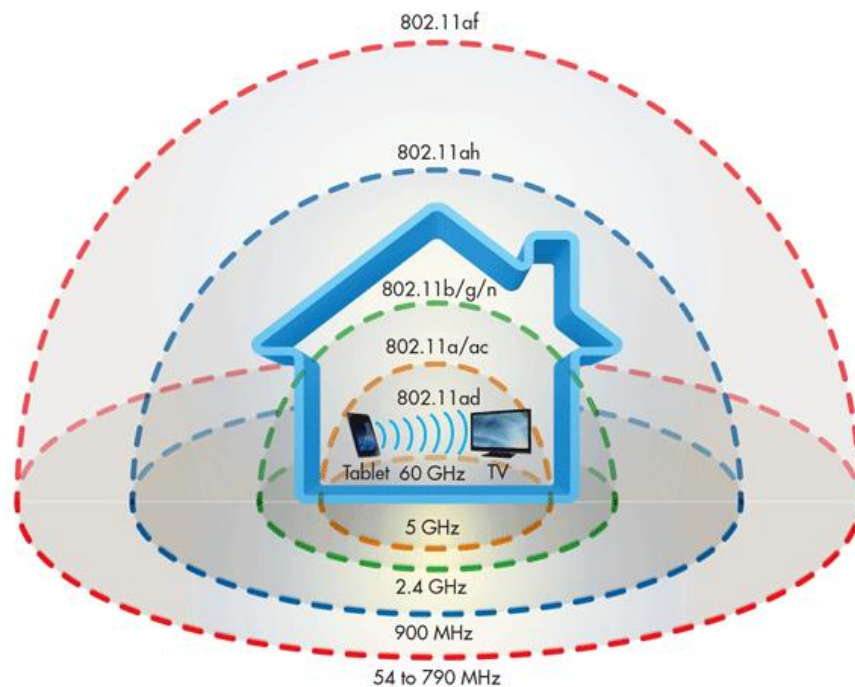


Рисунок 1.9 – Зони покриття та частоти Wi-Fi-мереж

Однак для зазначених переваг варто мати всі пристрої у мережі, які підтримують новий стандарт. Перехід на Wi-Fi 6 може не мати значного впливу на персональне підключення, оскільки швидкість й покриття сигналу можуть залишитися практично незмінними. І хоча один маршрутизатор Wi-Fi 6 може бути кроком вперед, для забезпечення стабільного сигналу у великих будівлях, особливо зі стінами та перегородками, може знадобитися використання кількох точок доступу. В цьому випадку ефективність мережі буде залежати не лише від підтримки нових технологій стандарту, але і від здатності клієнтських пристроїв їх використовувати.

З часом, коли більше пристроїв будуть підтримувати Wi-Fi 6, інновації цього стандарту можуть виявити свій потенціал у покращенні швидкості, ефективності та надійності бездротових мереж.

На базі розглянутого можна зробити висновок, що розвиток нових методів покращення помехостійкості та збільшення швидкості передачі у технології Wi-Fi є важливим для подальшого розвитку бездротових мереж. Хоча перехід від стандарту Wi-Fi 5 до Wi-Fi 6 не є настільки проривним, як перехід на попередньому етапі, все ж нові можливості, які вводить Wi-Fi 6, важливі для забезпечення оптимальної пропускну здатності та надійності мережі, особливо в умовах високої щільності пристроїв та завантаженості радіотрафіку.

Розробка нових методів покращення помехостійкості дозволить зменшити вплив зовнішніх перешкод на якість сигналу та підвищити стійкість мережі у вимогливих умовах експлуатації. Збільшення швидкості передачі також є важливим аспектом, оскільки споживачі все більше вимагають від мереж високої швидкості та продуктивності. Такі покращення допоможуть забезпечити задоволення потреб користувачів і підтримати подальший розвиток технології Wi-Fi.

## 2 МЕТОДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ WI-FI-МЕРЕЖ

### 2.1 Аналіз видів перешкод у WI-FI-мережах

Аналіз різних форм завад у мережах Wi-Fi є важливим завданням у теорії зв'язку. Він дозволяє визначити параметри системи передачі даних, такі як завадостійкість та швидкість передачі. Ці параметри відображають якість та обсяг переданої інформації. Оцінка ймовірності помилки на каналі передачі інформації дозволяє зрозуміти, як різні сигнальні конструкції впливають на перешкодостійкість. Завади та спотворення є ключовими факторами, що обмежують пропускну здатність і точність передачі даних в телекомунікаціях та системах вимірювання сигналів. Моделювання та ідентифікація впливу цих факторів становлять основу теорії та практики комунікацій. Зниження рівня завад та усунення спотворень є важливими завданнями у стільниковому зв'язку, розпізнаванні мови, обробці зображень, медичній обробці сигналів та інших областях. Завадою може бути будь-який небажаний сигнал, що перешкоджає зв'язку, вимірюванням, сприйняттю чи обробці сигналу. Вони присутні у різних середовищах, наприклад, акустичний фоновий шум, електронні шуми пристроїв, радіочастотний шум, суміжні радіоперешкоди, спотворення радіоканалу та інші. Завади призводять до помилок передачі та порушень зв'язку. Тому розробка методів, що забезпечують інформаційні сигнали високої якості, є важливою. Успішність методів обробки залежить від їх здатності характеризувати та моделювати шумові процеси. Залежно від джерела, завади можуть бути класифіковані як акустичні, електронні, електромагнітні та інші. Важливо класифікувати їх за спектральними та часовими формами.

Розглядаючи частотний спектр або часові характеристики, завади можуть мати кілька типів. Білий шум є чисто випадковим і має рівномірний спектр потужності, включаючи всі частоти з однаковою інтенсивністю. Він

визначається імпульсною автокореляцією. Обмежений смуговий білий шум також має рівномірний спектр потужності, але з обмеженою смугою пропускання, яка зазвичай відповідає спектру пристрою або інформаційному сигналу. Автокореляція цього шуму має sinc-форму. Імпульсні завади характеризуються короткочасними імпульсами, що мають випадкову змінну амплітуду, тривалість і час появи. Перехідні завадові імпульси виникають з довготривалих завадових імпульсів, таких як сплески або клацання. Кольоровий шум має широкосмуговий спектр, який не є рівномірним. Вузкосмугова завада обмежується дуже малим діапазоном частот, як у випадку шуму 50 або 60 Гц від електричної мережі. Ці різні типи завад використовуються для теоретичного моделювання впливу на якість передачі сигналів та оцінки завадостійкості систем передачі інформації.

## 2.2 Моделі типових видів перешкод

Більшість завад, що впливають на реальний канал зв'язку, можна розподілити на дві великі групи: флуктуаційні і нефлуктуаційні. Флуктуаційні завади – це неперервні випадкові процеси з нульовим середнім значенням і нормальним розподілом, як, наприклад, білий або кольоровий шум. Оскільки більшість Wi-Fi-систем працюють в обмеженому діапазоні частот, то спектральний характер флуктуаційних завад обмежений.

Другий тип це нефлуктуаційні завади, такі як імпульсні або квазіімпульсні моделі, які, зазвичай, мають менші рівні в порівнянні з корисним сигналом. Проблема полягає у тому, щоб ефективно приглушити ці типи завад без значного погіршення завадостійкості щодо флуктуаційних завад. Моделі шуму часто представлені у формі стаціонарного випадкового процесу, такого як "білий Гаусівський шум", з відповідною кореляційною функцією:

$$R(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau), \quad (2.1)$$

де  $N_0$  – функція, яка описує розподіл потужності шуму відносно частоти на одному напрямку.

Моделі типових нефлюктуаційних завад, що можуть бути співвимірними з корисним сигналом за амплітудою, можна описати наступним чином:

а) гармонічна завада:

$$S_3(t) = \mu A_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_n)t + \varphi_n], \quad (2.2)$$

де  $\mu$  – інтенсивність;

$\Delta\omega_n$  – розлад частотний;

$\varphi_n$  – початкова фаза завади.

б) імпульсна завада, що включає в себе випадкові короткочасні шумові імпульси, що виникають внаслідок різних джерел, таких як перешкоди перемикання, електромагнітні втручання або непридатне середовище передачі. На рисунку 2.1,а представлено ідеальний імпульс та його частотний спектр, при цьому в реальних Wi-Fi-системах імпульсні завади часто мають тривалість, яка перевищує одну вибірку. Наприклад, короткочасні імпульси тривалістю до 3 мілісекунд можна вважати імпульсними завадами. На рисунку 2.1,б та рисунку 2.1,в наведено приклади короткочасних імпульсів та їх спектри.

У Wi-Fi-системах імпульсні завади виникають у певний момент і місце, після чого поширюються через канал до отримувача. Імпульс, що виник, розподіляється в часі й може бути розглянутий як імпульсна характеристика каналу. Канал зв'язку може мати лінійну або нелінійну, стаціонарну або змінну з часом характеристику. Багато Wi-Fi-систем демонструють нелінійну поведінку у відповідь на імпульс великої амплітуди

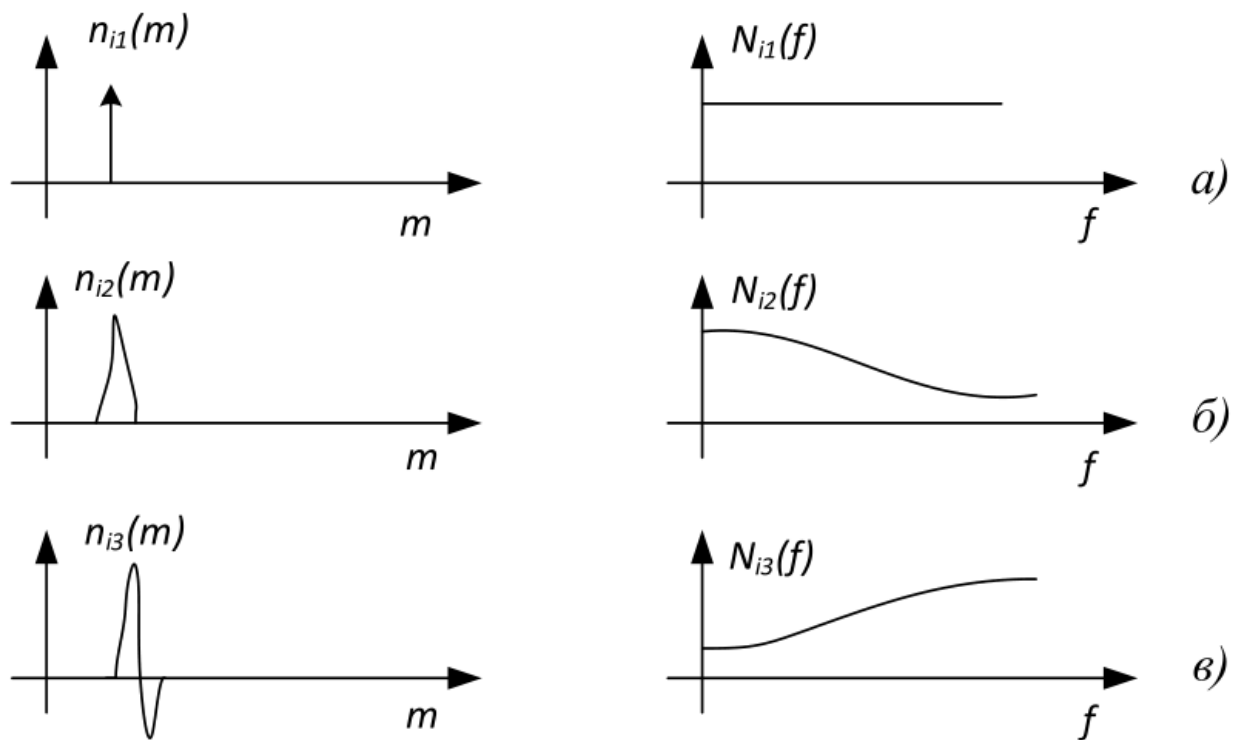


Рисунок 2.1 – Ідеальний імпульс та його спектр

Імпульсна шумова послідовність  $n_i(m)$  складається з імпульсів короткої тривалості, випадкової амплітуди, тривалості та часу появи. Її можна змодельовати як вихід фільтра, збудженого амплітудно-модульованою випадковою двійковою послідовністю:

$$n_i(m) = \sum_{k=0}^{P-1} h(k)n(m-k)b(m-k). \quad (2.3)$$

У рівнянні (2.3)  $b(m-k)$  – це модель випадкової послідовності з двійковими значеннями часу виникнення імпульсного шуму,  $n(m-k)$  – модель випадкового процесу з неперервною амплітудою імпульсу, а  $h(m)$  – імпульсна характеристика фільтра, який моделює тривалість і форму кожного імпульсу. Коли нестационарні процеси від окремих імпульсів частково накладаються один на одного, виникають квазіімпульсні завади.

Перехідні завадові імпульси, які спостерігаються у більшості WiFi-систем, являють собою сплески шуму або довгі клацання, спричинені перешкодами або пошкодженням сигналів під час зберігання чи передачі. Такі завади характеризуються високою частотою пульсацій і складаються з короткого різкого початкового імпульсу, за яким слідує загасаючі низькочастотні коливання, як показано на рисунку 2.2. Початковий імпульс зазвичай зумовлений зовнішніми чи внутрішніми імпульсними перешкодами, тоді як коливання часто пов'язані з резонансом каналу зв'язку, збудженого цим початковим імпульсом, і можуть розглядатися як відповідь каналу на початковий імпульс.

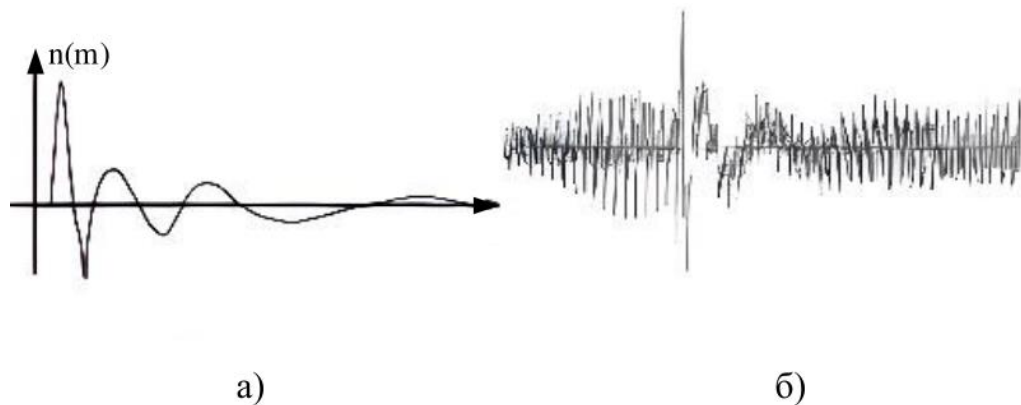


Рисунок 2.2 – Перехідні завадові імпульси: а) перехідний імпульс;  
б) випадковий сигнал

Нипова форма хвилі перехідного імпульсу часто має дві різні фази. Першу фазу характеризує початкова високоамплітудна імпульсна відповідь системи, тоді як друга фаза включає загасаючі коливання, що призводять до адитивних спотворень. Початковий імпульс є відносно коротким і триває близько 1-5 мс, тоді як осциляційний хвіст має більшу тривалість і може тривати до 50 мс або більше. Таку поведінку можна віднести до нелінійних режимів відгуку. Крім того, електромагнітні хвилі, які завжди присутні в навколишньому середовищі, створюють фоновий шум, що може впливати на

роботу Wi-Fi-систем. Більшість із цих завад є зосередженими і мають частотний спектр у вигляді вузької смуги частот, яка вужча за смугу частот інформаційного сигналу. Джерела таких завад можуть бути природного або штучного походження. Умови поширення зосереджених завад  $p_f$  корисних сигналів часто схожі, тому статистичні характеристики таких завад подібні до характеристик корисного сигналу та залежать від конкретних умов зв'язку. Для точного моделювання необхідно враховувати як їх часові, так й спектральні характеристики.

### 2.3 Визначення завад у Wi-Fi мережах

Для кількісного аналізу погіршення якості сигналу в Wi-Fi мережах, викликаного нефлюктуаційною імпульсною завадою, існує кілька методів. Один із підходів полягає в оцінці відсотка вибірок сигналу, які були спотворені імпульсами, а також у розрахунку середнього значення та дисперсії інтервалу між появами імпульсів. Важливо також визначити середнє співвідношення сигнал/шум та миттєве співвідношення сигнал/шум. У випадку імпульсного шуму, що виникає у вигляді сплесків, необхідно враховувати додаткові параметри, такі як середні значення та дисперсії кількості імпульсів у пакеті, тривалість цих пакетів і інтервали між ними. Ці характеристики дозволяють глибше зрозуміти природу завад і їхній вплив на якість Wi-Fi сигналу.

Середнє співвідношення сигналу до імпульсної завади, усереднене по всій часовій послідовності, включаючи періоди, коли імпульси відсутні, залежить від двох ключових параметрів: середньої потужності кожного імпульсу та частоти появи імпульсної завади. Нехай  $P_i b(m)$  - середня потужність кожного імпульсу, а  $P_s(m)$  – потужність сигналу. Миттєве співвідношення сигнал/шум може бути визначене за допомогою цих параметрів і використовується для оцінки якості сигналу в присутності імпульсного шуму:

$$SINR(m) = \frac{P_s(m)}{P_i b(m)}. \quad (2.4)$$

Середнє відношення сигналу до імпульсного шуму можна визначити за допомогою параметра  $\alpha$ , який представляє частку вибірок сигналу, що забруднені імпульсною завадою:

$$SINR = \frac{P_s}{\alpha P_i}. \quad (2.5)$$

З рівняння (2.5) для заданої потужності сигналу існує багато пар значень  $\alpha$  та  $P_i$ , які можуть дати те саме середнє  $SINR$ . Простий метод виявлення імпульсних завад полягає у встановленні певного амплітудного порогу та класифікації вибірки з амплітудами вище заданої межі як завади. Цей метод працює досить добре для відносно великих імпульсів, але неефективний, коли амплітуда завади падає нижче рівня сигналу.

Для точного моделювання імпульсних завад у Wi-Fi мережах важливо мати структуру, яка враховує як часові, так і спектральні характеристики завад. Це дозволяє створити точні статистичні моделі завад, що є критично важливим для якісної класифікації та покращення сигналу в умовах зашумленості. Одним із найпростіших методів моделювання завад, який часто використовується на практиці, є оцінка статистичних характеристик завад під час неактивності інформаційного сигналу. Цей підхід включає використання прихованих моделей Маркова (НММ) або змішаних Гаусівських моделей (GMM).

Розглянуті моделі дозволяють ефективно декодувати базові стани сигналу та завади, а також розпізнавати та підсилювати зашумлені сигнали, забезпечуючи кращу якість передачі інформації в Wi-Fi мережах. Це є критично важливим для підтримки стабільної роботи мережі та забезпечення високої швидкості передачі даних навіть в умовах наявності імпульсних завад.

Для покращення процесу виявлення можна використовувати характерні відмінності між імпульсною завадою та сигналом. Така завада вносить нехарактерні розриви в корельований сигнал, що стають більш помітними, коли сигнал диференціюється. Операція диференціювання еквівалентна декореляції або спектральному відбілюванню.

Кореляційна структура сигналу може бути змодельована лінійним предиктором, а процес декореляції може бути досягнутий за допомогою зворотної фільтрації. Модель лінійного предиктора може бути всеполюсним фільтром, що моделює резонанси (смуги) спектральної огинаючої сигналу або системи. На рисунку 2.3 показано модель сигналу з завадами.

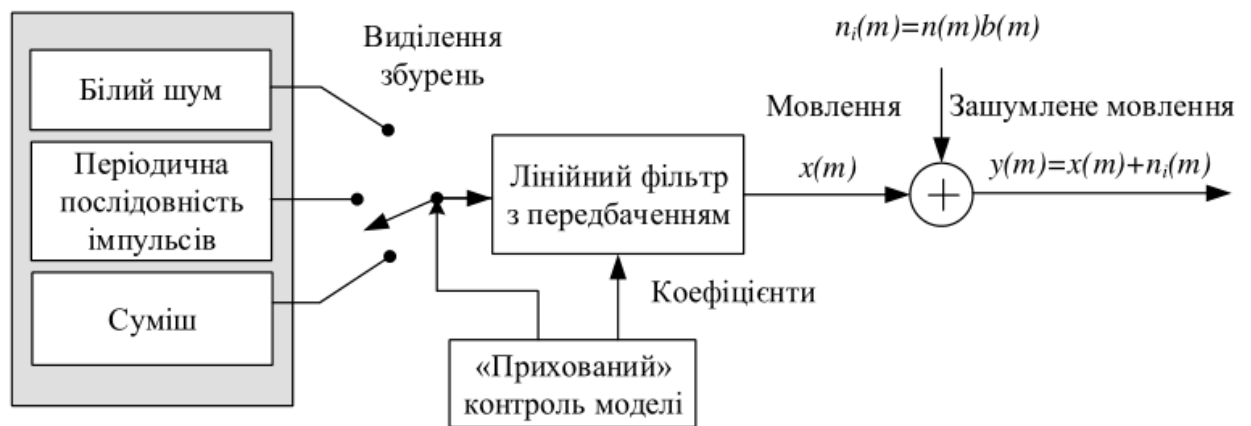


Рисунок 2.3 – Модель у якій сигнал піддавався перешкодам або спотворенню

Модель сигналу з завадою може бути описана як суперпозиція інформаційного сигналу та імпульсної завади. У цій моделі, безшумний сигнал  $\{x(m)\}$  представляє собою результат лінійного прогнозування, де інформаційний сигнал моделюється лінійним предиктором. Це може включати в себе різні характеристики сигналу, такі як тренди, сезонність або інші регулярні зміни в часовому ряді.

Щодо імпульсної завади, вона моделюється як амплітудно-модульований бінарний процес. Це означає, що імпульси шуму мають

випадкову амплітуду та час виникнення, а їх поява амплітудою модулюється бінарним процесом, наприклад, 0 або 1, вказуючи на наявність чи відсутність шумового імпульсу у кожен момент часу.

Така модель дозволяє аналізувати вплив імпульсних завад на безшумний сигнал, допомагаючи зрозуміти, як ці завади впливають на якість та достовірність інформації, переданої у сигналі.

$$x(m) = \sum_{k=1}^P \alpha_k x(m-k) + e(m). \quad (2.6)$$

Де  $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_P]^T$  – вектор-коефіцієнт лінійного предиктора порядку  $P$  та збудження  $e(m)$ . можуть бути шумоподібним сигналом або сумішшю випадкової завади та квазіперіодичної серії імпульсів. Для виявлення імпульсної завади використовують детектори, що базуються на спостереженні лінійних предикторів й є ефективними моделями для корельованих сигналів, але менш ефективними для некорельованого бінарного шуму імпульсного типу. Відповідно детектори, що використовують лінійні предиктори, можуть ефективно виявляти імпульсні завади в сигналах, де присутня кореляція між сусідніми вимірами. Проте, вони можуть бути менш ефективними в розпізнаванні імпульсів у некорельованому бінарному шумі, де випадковість виникнення імпульсів не має вираженої структури або закономірності.

Таким чином, для ефективного виявлення імпульсних завад у сигналах з некорельованим бінарним шумом можуть вимагатися спеціалізовані методи аналізу, які враховують специфіку такого типу шуму та завад.

При перетворенні зашумленого сигналу у сигнал збудження предиктора спостерігаються наступні зміни. Амплітуда сигналу зменшується, наближаючись до вихідного сигналу збудження, тоді як амплітуда завади залишається практично незмінною або навіть збільшується. А сам сигнал стає менш корельованим, в той час як імпульсна завада стає більш розмитою і

перетворюється у масштабовану версію імпульсної характеристики інверсного фільтра.

Обидва ці ефекти сприяють покращенню виявлення завади. Відповідно, поліпшення виявлення шумового імпульсу, що досягнуте за допомогою зворотної фільтрації, може бути досить значним й залежить від динамічної зміни кореляційної структури сигналу з часом. Таким чином, можемо переписати модель WiFi-сигналу з завадою:

$$y(m) = x(m) + n_i(m) = \sum_{k=1}^P \alpha_k x(m-k) + e(m) + n_i(m), \quad (2.7)$$

де  $y(m)$ ,  $x(m)$  – зашумлений сигнал;  $x(m)$  – основний сигнал;  $n_i(m)$  – шум.

Використовуючи оцінку вектора коефіцієнтів предиктора, зашумлений сигнал  $y(m)$  може бути зворотно відфільтрований й перетворений на шумовий сигнал збудження  $v(m)$  наступним чином:

$$v(m) = y(m) - \sum_{k=1}^P \alpha_k x(m-k), \quad (2.8)$$

$$v(m) = x(m) + n_i(m) - \sum_{k=1}^P \alpha_k (x(m-k) + n_i(m-k)), \quad (2.9)$$

де  $a_k$  – похибка оцінювання коефіцієнту предиктора.

Використовуючи вираз (2.6) рівняння (2.9) можна представити у такій формі:

$$v(m) = e(m) + n_i(m) + \sum_{k=1}^P \alpha_k x(m-k) - \sum_{k=1}^P \alpha_k n_i(m-k). \quad (2.10)$$

З виразу (2.10) можна виділити три складові, що відображають появу завади: імпульсні завади  $n_i(m)$ , ефект останніх  $P$  вимірів завади та збільшення дисперсії сигналу збудження, викликане помилкою оцінки вектора параметрів.

Після застосування запропонованого методу виникає можна зробити припущення, що відношення імпульсної завади до шумового сигналу може бути визначене:

$$\frac{P_i}{P_S} = \frac{E[n_i^2(m)]}{E[x^2(m)]} \quad (2.11)$$

де  $E[\cdot]$  – оператор очікування.

Припускаючи, що головним компонентом у зашумленому сигналі збудження  $v(m)$  є імпульс  $n_i(m)$ , відношення шуму до сигналу збудження дорівнює:

$$\frac{P_i}{P_e} = \frac{E[n_i^2(m)]}{E[e^2(m)]} \quad (2.12)$$

Сумарний ефект від прирісту у відношенні імпульсної завади до сигналу  $INSR$  отримуємо наступним чином:

$$INSR = \frac{E[x^2(m)]}{E[e^2(m)]} \quad (2.13)$$

Таким чином, застосування зворотної фільтрації у WiFi-системах може мати велике значення через особливості бездротового середовища. В бездротових мережах шум може бути особливо проблематичним через різноманітність джерел інтерференції, включаючи сигнали від інших пристроїв, перешкоди у середовищі та ефекти розсіювання сигналу [18].

Зворотна фільтрація може допомогти зменшити вплив цих шумових складових, спрямовуючи увагу на корисний сигнал та покращуючи співвідношення сигнал/шум. Це може призвести до збільшення швидкості передачі даних, зниження помилкових передач та покращення загальної надійності мережі.

Однак важливо враховувати, що застосування зворотної фільтрації може потребувати додаткових обчислень та ресурсів обробки сигналу, що може бути важливим у вимогливих до продуктивності системах, таких як бездротові пристрої. Тому оптимальне використання цього методу потребує збалансованого підходу з урахуванням специфічних потреб і обмежень конкретної Wi-Fi-системи [19].

Застосування зворотної фільтрації в WiFi-мережах може мати різноманітні застосування, включаючи покращення якості сигналу, збільшення швидкості передачі даних та збільшення помехостійкості. Ось деякі приклади та числові значення застосування цього методу у WiFi-мережах.

1. Зменшення впливу ISI (міжсимвольного перехресного впливу) - може виникати в бездротових каналах через розсіювання сигналу. Зворотна фільтрація може допомогти знизити цей вплив, покращуючи чіткість сигналу. Застосування фільтра зворотної фільтрації може зменшити ISI на 20-30%.

2. Використання зворотної фільтрації може знизити рівень шуму, що дозволяє збільшити пропускну здатність мережі на 10-20%.

3. Покращення якості послуг (QoS) - зворотна фільтрація може допомогти зменшити вплив шуму та інтерференції на сигнал, що може покращити якість обслуговування в бездротових мережах, відповідно, зниження пінгу та покращення стабільності з'єднання на 15-25%.

4. Мінімізація помилкових передач – шум та спотворення сигналу можуть призвести до помилкових передач даних в Wi-Fi-мережах. Застосування зворотної фільтрації може знизити цей ризик, поліпшуючи розпізнавання та інтерпретацію сигналів, зменшення втрат пакетів даних на 10-15%.

Реальні результати можуть варіюватися в залежності від конкретних умов та налаштувань мережі. Аналіз умов та факторів функціонування Wi-Fi-мереж передачі виявив, що існують різні типи нефлюктуаційних завад, які можуть негативно впливати на їх завадостійкість. Основними з них є.

1. Гармонічна завада – тип завади може виникати через наявність гармонік частоти сигналу Wi-Fi, які не є частиною основного сигналу, але присутні у спектрі. Гармоніки можуть призводити до спотворень сигналу та інтерференції, що ускладнює приймання та розпізнавання сигналу Wi-Fi.

2. Імпульсна завада – тип завади характеризується короткочасними перешкодами або сплесками, що можуть виникати в Wi-Fi-мережі. Їх виникнення може бути спричинене різними факторами, такими як електромагнітні перешкоди або несправності в обладнанні.

3. Мультиплікативні спотворення – й тип завад виникає через множення сигналу Wi-Fi на інші сигнали або шуми в каналі передачі. Це може призвести до спотворень сигналу та зниження якості передачі даних у Wi-Fi-мережі.

Ці типи завад можуть значно ускладнити процес передачі та прийому даних у Wi-Fi-мережах, тому для забезпечення ефективної роботи мережі важливо враховувати їх при проектуванні та експлуатації.

#### 2.4 Метод вдосконалення Wi-Fi мережі з урахуванням ЕМС

Проектування Wi-Fi-мереж з урахуванням ЕМС є важливим аспектом для забезпечення ефективності та надійності мережі. Це процес включає в себе ретельний вибір частотних каналів, розташування антен точок доступу, а також налаштування режимів роботи обладнання, таких як потужність передавачів та швидкість передачі даних. Окрім цього, визначається необхідна кількість точок доступу та обираються моделі приймально-передавальних антен з оптимальною орієнтацією.

Попередня оцінка працездатності мережі здійснюється шляхом розрахунку рівнів сигналів і перешкод у стільниках, що дозволяє вибрати найкращі режими роботи. Всі компоненти мережі налаштовуються з урахуванням отриманих даних та залежностей міжсистемної ЕМС, які було виявлено при аналізі електромагнітного середовища (ЕМО).

Для зниження впливу електромагнітних завад використовуються різні технічні та організаційні заходи, такі як раціональний розподіл робочих частот та введення частотних, регіональних і часових обмежень для радіоелектронних пристроїв. Це дозволяє зменшити рівень внутрішньосистемних і міжсистемних перешкод ще на етапі проектування, забезпечуючи високу ефективність роботи мережі [2].

Програмна складова процесу проектування безпроводових мереж з урахуванням електромагнітної сумісності (ЕМС) відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної та надійної роботи мережі. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє створювати точні моделі електромагнітного середовища, що враховують всі можливі джерела перешкод, такі як інші безпроводові мережі, пристрої Bluetooth та мікрохвильові печі. Це допомагає передбачати потенційні проблеми з ЕМС і знаходити оптимальні рішення для їх усунення.

Програмне забезпечення також дозволяє аналізувати розподіл частотних каналів, визначати оптимальні канали для використання і уникати перекриттів, зменшуючи вплив перешкод. Моделювання дозволяє визначити оптимальне розташування антен точок доступу, налаштування потужності передавачів та швидкості передачі даних, що забезпечує максимальну ефективність мережі. Інтеграція даних про міжсистемну ЕМС, отриманих при аналізі електромагнітного оточення, дозволяє оптимізувати всі компоненти мережі, забезпечуючи надійну та стабільну роботу WLAN в умовах високого рівня перешкод.

Вимоги до смуги пропускання в розрахунку на одного клієнта залежать від типу додатків, які він використовує [14], і їх чутливості до затримок (QoS). Поточкові додатки, такі як телефонія та відео, потребують постійної і надійної смуги пропускання, тоді як пульсуючі додатки, наприклад, електронна пошта чи веб-браузинг, мають непостійні вимоги.

Зі збільшенням кількості клієнтів у мережі зростають вимоги до сумарної смуги пропускання. У безпроводових мережах значна частина смуги

пропускання витрачається на прикладні потреби. Наприклад, у стандарті IEEE 802.11b при швидкості передачі 11 Мбіт/с реальна продуктивність складає близько 6 Мбіт/с. Для стандартів IEEE 802.11a/g при швидкості передачі 54 Мбіт/с реальна продуктивність приблизно 22 Мбіт/с. Залежно від потреб користувачів WLAN у смузі пропускання, визначається кількість користувачів, що обслуговуються однією точкою доступу.

Типи використовуваних додатків значно впливають на обсяги переданих даних. Поточкові додатки, такі як передача голосу або відео, мають високі вимоги до смуги пропускання та чутливості до затримок, тоді як додатки пульсуючого типу, як-от HTTP або POP3, використовують смугу пропускання непостійно і непередбачувано. Це ускладнює визначення оптимальної кількості користувачів на одну точку доступу, яка, як правило, не повинна перевищувати 25.

Усі станції зазвичай мають однакові права доступу до середовища передачі. Збільшення кількості станцій призводить до підвищення ймовірності колізій і повторних передач, що, своєю чергою, викликає затримки. Для зменшення цього ефекту доцільно збільшити щільність розміщення точок доступу.

Існують два основні методи планування [15] розміщення точок доступу у Wi-Fi- мережах: за максимальною зоною обслуговування та за максимальною пропускну здатністю. Перший метод спрямований на забезпечення максимального покриття з мінімально можливою кількістю точок доступу. Такий підхід використовується переважно в мережах, де щільність користувачів невелика і становить близько 25 користувачів на одну точку доступу. У цьому випадку, зазвичай, використовуються додатки пульсуючого типу, які не потребують високої швидкості передачі даних, і швидкість роботи може бути зменшена до 1-2 Мбіт/с.

Другий метод планування орієнтований на максимальну пропускну здатність мережі, забезпечуючи високу продуктивність і швидкість передачі даних для кожного користувача. Цей підхід застосовується в мережах, де

використовуються додатки, що потребують високої швидкості передачі, або додатки, чутливі до затримок. Також він підходить для місць з високою щільністю користувачів, таких як офіси, торгові центри або стадіони. У таких мережах кожна точка доступу обслуговує менше користувачів, зазвичай до 12, що забезпечує високу якість обслуговування.

При впровадженні безпроводової мережі необхідно враховувати підключення точок доступу до розподільчої системи. Важливими аспектами є відстань до точки підключення, технологія підключення, віддаленість антен від точок доступу, втрати в кабелях, доступність електроживлення, IP-адресація, маршрутизація, використання VLAN і смуга пропускання.

Таким чином, планування безпроводових мереж є комплексним процесом, що вимагає врахування багатьох факторів для досягнення оптимальної продуктивності і покриття [17].

На другому етапі проектування Wi-Fi-мереж здійснюється вивчення та аналіз електромагнітної обстановки (ЕМО) в місці розгортання мережі. Це передбачає визначення наявності сигналів, що можуть впливати на роботу мережі. Спершу виявляються безпроводові системи, що функціонують у відповідних діапазонах частот у заданій місцевості. Також визначається обладнання, чутливе до радіоперешкод, і враховуються його характеристики.

Для ідентифікації випромінюючих радіоелектронних пристроїв, таких як мікрохвильові печі та медичне обладнання, проводиться детальний аналіз їх сигналів. Фіксуються параметри кожної виявленої перешкоди, включаючи тип сигналу, потужність, напрямок і поляризацію антени, амплітудно-частотну характеристику (АЧХ), а також час виявлення.

Аналіз електромагнітної обстановки проводиться за допомогою спектральних аналізаторів, які відображають енергію сигналів на різних частотах. Для захисту від високих рівнів сигналів, які можуть пошкодити аналізатор, використовуються вбудовані або зовнішні атенюатори, що знижують амплітуду сигналів.

На основі отриманих даних можна визначити центральну частоту, ширину частотного каналу і тип використовуваної модуляції. Для визначення напрямку джерела сигналу використовується спрямована антена. Обертаючи антену в різних напрямках, фіксується напрямок на джерело сигналу, що відповідає максимальному рівню сигналу. Змінюючи поляризацію антени (від горизонтальної до вертикальної), визначається поляризація антени, що випромінює сигнал.

Модуляція сигналу визначається за формою спектру випромінювання, зафіксованого аналізатором. Оскільки спектр сигналу може змінюватися в часі, аналізатори часто використовують режим фіксації максимальних рівнів випромінювання для отримання більш точних даних. Більшість сигналів, виявлених у смузі 2,4 ГГц, будуть OFDM, DSSS, FHSS або їх комбінації, наприклад, DSSS+OFDM [5].

DSSS-сигнал (Direct Sequence Spread Spectrum) можна ідентифікувати за допомогою ширини використовуваного спектра, яка складає 22 МГц, та характерної форми сигналу. На прикладі спектрального аналізу, показаного на рисунку 2.4, видно два сильних сигнали DSSS в смузі 2,4 ГГц, що мають потужність близько -60 дБ. Один із сигналів випромінюється на першому частотному каналі (2412 МГц), а інший на шостому (2437 МГц). OFDM-сигнал (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) також можна ідентифікувати завдяки його специфічній спектральній масці. Визначення типу сигналу за допомогою спектрального аналізу дозволяє точніше оцінити електромагнітну обстановку (ЕМО) і врахувати вплив потенційних перешкод під час проектування безпроводової мережі. При плануванні мережі необхідно ретельно аналізувати всі можливі джерела перешкод, їх характеристики та вплив на майбутню мережу. Використання програмно-апаратних спектральних аналізаторів дозволяє детально дослідити електромагнітне середовище, що, в свою чергу, забезпечує більш точне та ефективне розгортання Wi-Fi-мереж [12].

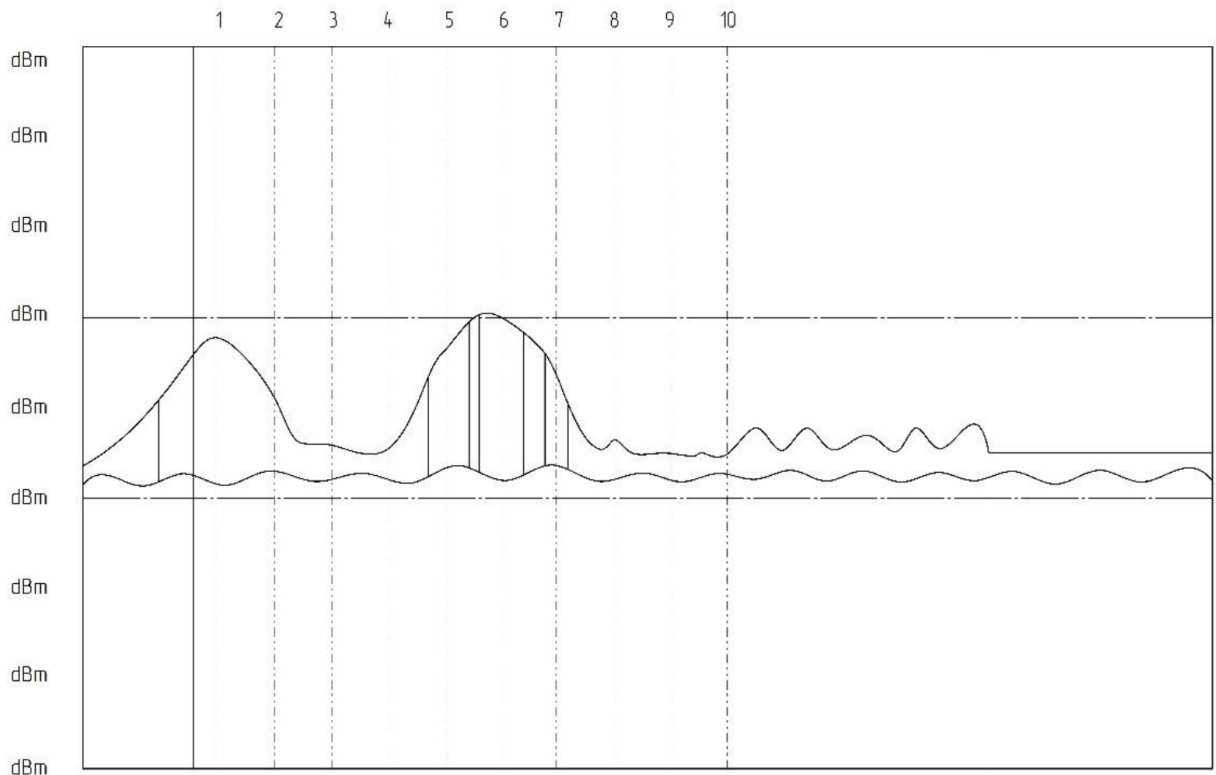


Рисунок 2.4 – Спектральний аналіз сигналу DSSS

Сигнал FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) можна ідентифікувати за допомогою численних піків, які утворюються внаслідок того, що сигнал переходить з каналу на канал через інтервали 1 МГц по всій доступній смузі частот. На рисунку 2.5 це можна побачити як ряд піків, які відображають частотні переходи сигналу.

Визначення типів сигналів, таких як DSSS і FHSS, є критично важливим кроком при аналізі електромагнітної обстановки (ЕМО) і плануванні безпроводових мереж. Така ідентифікація допомагає зрозуміти характер перешкод та ефективно враховувати їх при розробці мережевої інфраструктури.

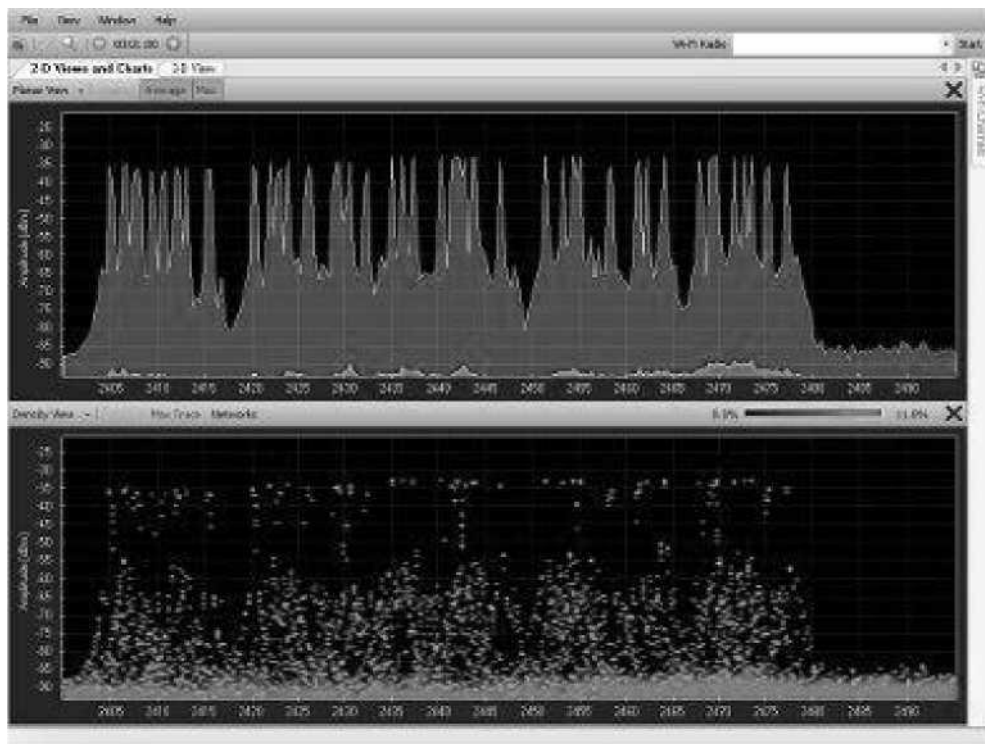


Рисунок 2.5 – Спектральний аналіз сигналу FHSS

При аналізі ЕМО важливо виявити всі джерела потенційних перешкод, визначити їх параметри, такі як потужність, напрямок і поляризація антени, тип модуляції і час активності. Ці дані дозволяють оптимально розмістити точки доступу та налаштувати їх роботу, забезпечуючи максимальну продуктивність і надійність Wi-Fi мережі. Використання спектральних аналізаторів ключовими інструментами в цьому процесі, вони дозволяють графічно відобразити енергію сигналів на різних частотах, що допомагає ідентифікувати типи сигналів та рівень перешкод.

Додаткову інформацію про різні параметри, такі як шифрування, швидкість роботи, інтенсивність трафіку тощо, можна отримати за допомогою аналізаторів протоколів та сніферів. Ці інструменти дозволяють детально аналізувати роботу Wi-Fi-мереж, збираючи та аналізуючи дані про передані пакети.

Аналізатори протоколів можуть надавати детальну інформацію про структуру мережевого трафіку, включаючи типи протоколів,

використовуваних у мережі, рівні сигналу, затримки та інші параметри, які впливають на продуктивність мережі. Вони також дозволяють визначити наявність проблем із з'єднанням, таких як висока частота колізій або повторних передач, що може вказувати на необхідність оптимізації мережевих налаштувань. Сніфери використовуються для перехоплення і аналізу трафіку, що проходить через мережу. Вони можуть допомогти ідентифікувати типи переданих даних, використовувати алгоритми шифрування, а також виявити потенційні загрози безпеці, такі як неавторизовані пристрої або підозрілі активності. Сніфери дозволяють отримувати інформацію про інтенсивність трафіку, що допомагає краще планувати ресурси та забезпечувати стабільну роботу мережі навіть при високих навантаженнях.

Використання безпроводових аналізаторів протоколів та сніферів є невід'ємною частиною процесу оптимізації і підтримки Wi-Fi-мереж. Вони надають можливість оперативно виявляти та вирішувати проблеми, підвищувати ефективність роботи мережі та забезпечувати високий рівень безпеки і якості обслуговування для всіх користувачів.

## 2.5 Метод вдосконалення Wi-Fi мережі за допомогою ПЧК

Сучасні бездротові системи передачі даних відзначаються високими показниками пропускної здатності. Різке зростання класичної межі Шеннона для пропускної здатності систем зв'язку стало можливим завдяки впровадженню просторової обробки сигналів, або технології MIMO (Multiple Input-Multiple Output – множинний вхід-множинний вихід), яка використовує ефект множинного поширення, де передані сигнали відбиваються від різних об'єктів та перешкод, а приймальна антена приймає сигнали під різними кутами і в різний час. Застосування цієї технології дозволяє через рознесення сигналу при передачі та прийомі зменшити відсоток біт, що отримані з помилками, тим самим підвищуючи завадостійкість каналів зв'язку.

Методи передачі інформації в сучасних системах широкосмугового бездротового доступу ґрунтуються на використанні технології МІМО. Переваги та особливості цього методу були продемонстровані на лабораторному прототипі ще у 1998 році, і згодом він був включений до стандартів широкосмугового доступу IEEE 802.11n і IEEE 802.16e [7]. Основна ідея технології МІМО показана на рисунку 2.6.

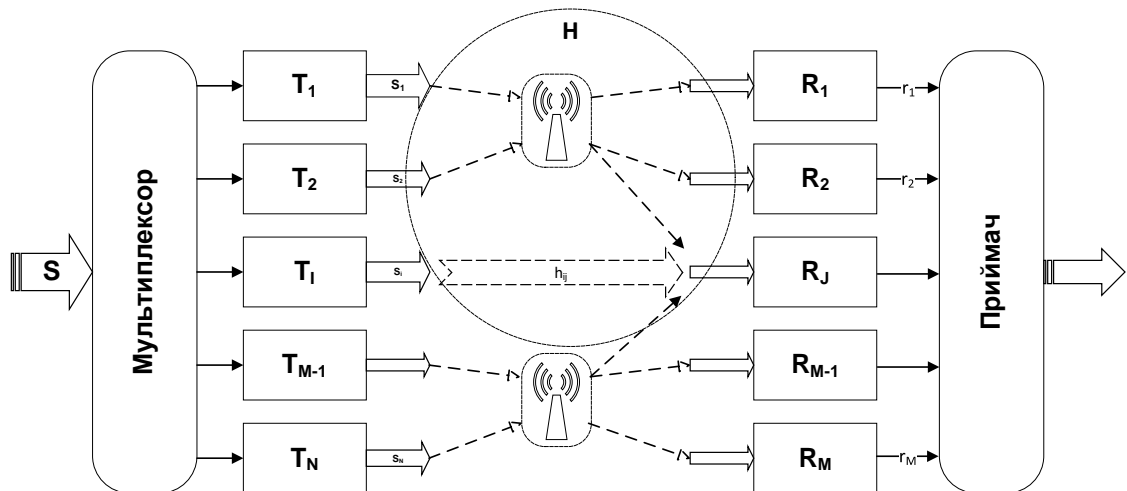


Рисунок 2.6 – Структура роботи системи МІМО

Передавальна частина системи включає  $M$  передавачів ( $T_1 \dots T_M$ ) із передавальними антенами, тоді як приймальна частина включає  $N$  приймачів і приймальних антен ( $R_1 \dots R_N$ ). Вважається, що завмирання породжується розсіювальним середовищем  $H$  поширення радіосигналу. На рисунку 1 стрілками показано, що сигнал будь-якого з передавачів  $T_i$  може досягати входу будь-якого з приймачів ( $R_1 \dots R_N$ ), зазнаючи завмирання. Функціонування системи забезпечується мультиплексором на передачі, демультимплексором на прийомі та приймачем максимальної правдоподібності на приймальній стороні.

Отже вноситься просторова надмірність, завдяки якій вдається "пронизувати" турбулентне середовище поширення радіосигналу та при цьому уникнути впливу завмирань при відповідній обробці прийнятої сукупності

сигналів. Дана структура забезпечує передачу "від об'єму до об'єму" (from volume to volume). Це визначення підкреслює суттєву різницю між такою об'ємно-багатовимірною просторовою моделлю каналу та звичайною одновимірною моделлю, яка розглядається у вигляді простої лінії між передавачем та приймачем. Такі структури зазвичай позначають як MIMO ( $N \times M$ ) ( $N$  – кількість передавальних антен,  $M$  - кількість приймальних антен).

При цьому можлива велика різноманітність варіантів систем. Можна визначити такі варіанти структури MIMO (2x2):

1. Структура MIMO (1x2), іменована як SIMO (Single Input-Multiple Output-один вхід-багато виходів). Традиційна система радіозв'язку з одним передавачем і двома рознесеними в просторі антенами і приймачами.

2. Структура MIMO (2x1), іменована як MISO (Multiple Input-Single Output – багато входів – один вихід).

Термін ПЧК "просторово-часове кодування" (Space-Time Coding – STC) – в теорії інформації під завадостійким кодуванням прийнято розуміти процедуру, відповідно якої в передані повідомлення, вноситься надмірність, яка дає можливість виправляти канальні помилки при адекватному декодуванні. Зазвичай у традиційних методах кодування для введення надмірності використовується часовий ресурс (введення додаткових символів при блоковому, або згортковому кодуванні). При цьому платою за підвищення завадостійкості являється поява зниження швидкості передачі інформації. У розглянутих на рис.1 багатоантенних системах MIMO крім часового ресурсу (традиційне завадостійке кодування можливе також у будь-якому каналі " $T_I-R_J$ ") виникає можливість використовувати просторовий ресурс та вирішувати завдання оптимального введення надмірності, тобто використовувати оптимальні методи просторово-часового кодування, для забезпечення якнайкращого обміну надмірності на завадостійкість.

При практичному застосуванні систем MIMO потрібно вирішувати питання організації мультиплексної передачі сигналів від передавальних антен до приймальних. В основному застосовують часовий поділ сигналів.

Тобто організовується "кадр" передачі з усіма необхідними в таких випадках атрибутами кадрової синхронізації ("синхрослово" тощо). Обираючи метод модуляції сигналів-переносників можна вирішити питання швидкості передачі інформації в системі загалом [25].

У переважній більшості методів ПЧК у каналах МІМО неодмінною умовою теоретичного аналізу є квазістаціонарність каналу в такій формі [21]:

- в структурі МІМО передачу інформації можливо організувати кадрами (frame), які періодично передаються і мають спеціальну структуру;
- при зміні місця розташування передавальних і приймальних антен коефіцієнти передачі змінюються;
- коефіцієнти передачі на інтервалах декількох (зазвичай двох) поряд розташованих символів залишаються незмінними. Пропонована при цьому структура кадру (рисунок 2.7) може бути подібна до широко використовуваної форми кадру в стандарті США системи стільникового зв'язку IS-136 [26].

<b>Навчальна послідовність</b>	<b>Дані</b>	<b>Пілот-сигнали</b>	<b>Дані</b>	<b>Пілот-сигнали</b>	<b>Дані</b>	<b>Пілот-сигнали</b>	<b>Дані</b>
--------------------------------	-------------	----------------------	-------------	----------------------	-------------	----------------------	-------------

Рисунок 2.7 – Типова структура кадру просторово-часового кодування

Кадр включає в себе початкову навчальну (training) послідовність (НП) і періодично повторювані блоки переданих даних, які розділені пакетами пілот-сигналів (ПС). Структура НП може забезпечувати синхронізацію за кадрами. Використання пілот-сигналів ПС перед даними зумовлено необхідністю організації в демодуляторі когерентного прийому. Отже, увесь міжрядний простір передавальних і приймальних антен охоплено системою тимчасового мультиплексування, яка давно добре освоєна в системах стільникового мобільного зв'язку з часовим розподілом каналів TDMA.

Є дві групи методів ПЧК у каналах МІМО: просторово-часове решітчасте кодування (ПЧРК) та просторово-часове блокове кодування (ПЧБК).

Метод ПЧРК може поєднувати в собі переваги методів просторового різноманіття з можливістю виправлення помилок за допомогою виправлення коду та використовуючи оптимальні алгоритми декодування, які одночасно реалізують оптимальний алгоритм об'єднання сигналів різноманітності. Використовуючи традиційне коригувальне кодування додаючи при цьому надмірність у часовій області. У системах із ПЧРК вводиться надмірність також і в просторовій області, яка утворена кількома передавальними антенами й однією приймальною антеною (рис. 3). За рахунок ускладнення способів передачі і обробки сигналів на прийомі можливе отримання переваги у перешкодостійкості. Можна обрати для реалізації згортковий код зі швидкістю  $R=k/n$ . Кодер такого коду генерує послідовності, що утворюють кодову сітку, за допомогою якої алгоритм Вітербі в процесі декодування знаходить найбільш правдоподібний шлях.

На рисунку 2.8 показано модель системи з просторово-часовим решітчастим кодуванням, що містить кодер ПЧРК з  $n$  виходами, які під'єднані до  $n$  передавальних антен. Приймання виконується на одну антену, приймач містить декодер просторово-часового коду. Зазначимо, що представлено систему типу МІМО ( $n \times 1$ ), у якої обсяг рознесення  $m=n$ .

Приклади кодеру ПЧРК, конфігурації сигнального сузір'я восьмипозиційної фазової модуляції ФМ-8, і решітчастої діаграми коду показано на рисунку 2.9. На рисунку 2.9,а показано кодер згорткового коду з одиничною пам'яттю [7], двома виходами ( $n=2$ ) і погоджувальними многочленами  $g_1=5$  та  $g_2=1$  (D - символ затримки). Кодування виконується в алфавіті алгебраїчного кільця  $Z_8$  (кільце цілих чисел з операціями додавання і множення за модулем 8). Під час синтезу такої сигнально-кової конструкції широко застосовується ізоморфізм між символами алгебраїчного кільця  $Z_8$  та сигналами фазової модуляції ФМ-8 [24]. Виходи кодера  $c_1$  та  $c_2$  під'єднано до

відповідних входів передавачів рознесених передавальних антен. Для підвищення питомої швидкості передавання інформації в наведеному прикладі використовується фазова модуляція ФМ-8. Один крок решітчастої діаграми ПЧРК (рисунок 2.9,в) включає набори попередніх і наступних станів кодеру (1...7) та гілок, які їх з'єднують.

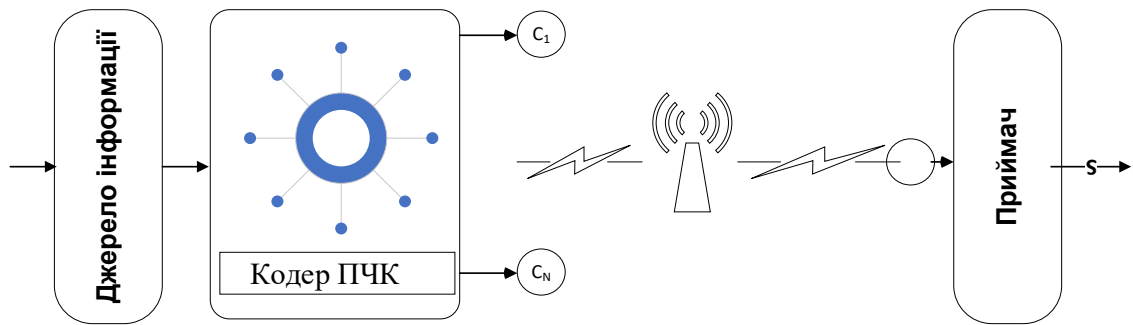


Рисунок 2.8 – Модель роботи Wi-Fi-мережи з ПЧР кодуванням

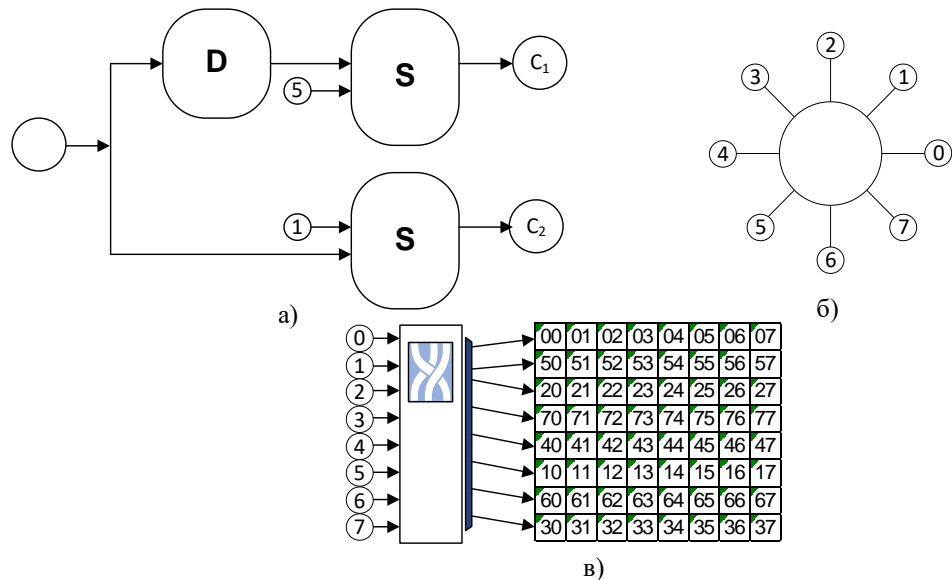


Рисунок 2.9 – Приклади кодеру ПЧРК: а) кодер; б) сигнальне сузір'я;  
в) решітчаста діаграма ПЧРК

Принцип просторово-часового блокового кодування наведено на рисунку 2.10 й представляє систему кодування в каналі МІМО (2x1), що

містить дві передавальні антени та одну приймальну. Відповідно до [27] вхідний потік символів, що передаються, розбивається на пари  $(c_1-c_2)$ , на першому напівтактовому інтервалі символ  $c_1$  відправляється через антену  $T_1$ , а символ  $c_2$  – через антену  $T_2$ . На другому напівтактовому інтервалі порядок передачі змінюється: через антену  $T_1$  передається інверсія символу  $c_2$ , а символ  $c_1$  передається через антену  $T_2$ . Блоковий код Alamouti – це розташування символів  $c$  у вигляді матриці в структурі кодера [27].

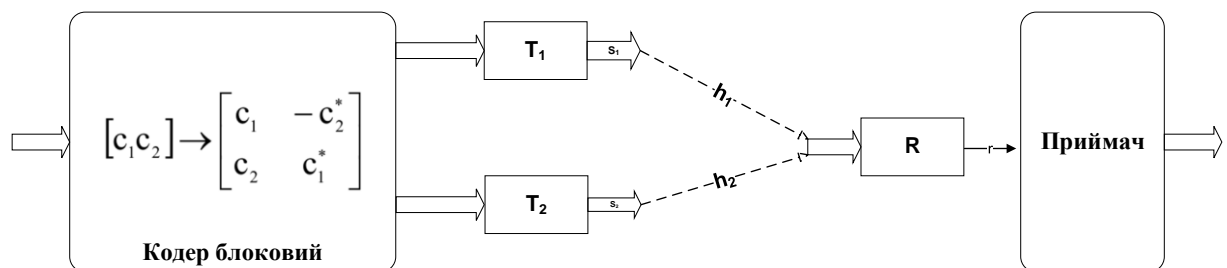


Рисунок 2.10 – Модель роботи блокового кодування у каналі MIMO

Коефіцієнти передачі каналу на сусідніх інтервалах залишаються сталими. Теоретично завдання пошуку оптимальних блокових кодів просторово-часової обробки редукується до використання ортогональних матриць відповідних форматів.

Таким чином, методи просторово-часового кодування мають такі переваги [29]:

1. У ПЧК, для сигналів-переносників, на відміну від широкосмугових сигналів, не потрібно значного розширення смуги частот за умови збереження однакового рівня стійкості до завад. Ця перевага є критичною для операторів систем бездротового зв'язку в умовах зростаючого попиту на послуги бездротового зв'язку, де дефіцит спектра стає гострішим, а вартість виділення частотних смуг для бездротових систем постійно зростає.

2. Універсальність та гнучкість методів ПЧК [30] надають найкращі можливості для обміну енергоефективності на частотну ефективність у багатопробієвих каналах.

3. Можливість комбінування методів ПЧК разом з високошвидкісними сигналами цифрової модуляції гарантує високі показники частотної ефективності.

4. Можливість подальшого підвищення стійкості до перешкод у системах із ПЧК передбачається за умови впровадження адаптивного регулювання рівнів переданих сигналів.

5. Можливість вбудовування ПЧК у структуру сигналів у багатокористувацьких мережах.

При аналізі алгоритмів підвищення пропускної здатності мережі шляхом використання методів адаптивної просторової обробки сигналів та пошуку балансу між підвищенням пропускної здатності технології МІМО було виявлено, що збільшення кількості незалежних радіоканалів призводить до зниження енергії на біт переданого повідомлення, що в свою чергу може підвищити ймовірність помилок на біт при прийнятті повідомлення.

Застосування наведених методів у системному програмуванні значно підвищує завадостійкість та швидкість передачі даних у WiFi-мережах. Оптимізація розташування точок доступу та вибір частотних каналів з урахуванням електромагнітної сумісності мінімізує внутрішні перешкоди, забезпечуючи стабільне та швидке з'єднання. Аналіз електромагнітної обстановки дозволяє ідентифікувати та уникати джерел перешкод, що підвищує загальну якість зв'язку.

Інтеграція з аналізаторів та сніферів дозволяє збирати інформацію про роботу мережі, а це дає змогу програмно налаштовувати мережу для досягнення оптимальної продуктивності та захисту від перешкод. Ці заходи є критично важливими у сучасних умовах зростаючого навантаження на мережі, забезпечуючи надійну та ефективну роботу WiFi-інфраструктури.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ

Вивчення та застосування алгоритмів для підвищення пропускної здатності мережі через методи адаптивної просторової обробки сигналів та оптимізацію технології MIMO є важливими в контексті розвитку бездротових комунікаційних систем, зокрема Wi-Fi. Збільшення кількості незалежних радіоканалів (MIMO) може покращити пропускну здатність мережі, проте це супроводжується деякими викликами.

З одного боку, збільшення кількості радіоканалів може допомогти в передачі більшого обсягу даних через різні антени, що сприяє підвищенню загальної пропускної здатності мережі. Однак це також може призвести до збільшення інтерференції між каналами та погіршення якості сигналу в каналах, особливо в умовах обмеженого спектру та високої залежності від шуму та спотворень.

Для збалансування цих аспектів, важливо розробляти алгоритми адаптивної обробки сигналів, які враховують специфіку кожного каналу та вміють ефективно керувати ресурсами. Ці алгоритми можуть включати в себе методи оптимізації параметрів передачі даних, адаптивного вибору антенних конфігурацій, а також управлінням інтерференцією.

Наприклад, можливо використовувати алгоритми Beamforming для активного керування напрямком сигналу, що дозволяє знижувати вплив інтерференції та покращувати якість сигналу для кожного користувача окремо. Також, можуть бути розроблені алгоритми для автоматичного вибору оптимальних параметрів MIMO в залежності від умов каналу та вимог мережі.

Враховуючи ці виклики та можливості, розробники мереж Wi-Fi стежать за новими рішеннями в галузі адаптивної просторової обробки сигналів та методів оптимізації MIMO для підвищення пропускної здатності та якості обслуговування користувачів.

Процес передачі сигналів у вищезгаданій системі передбачає одночасне випромінювання сигналів через  $M$  передавальних антен та повну інформацію про характеристики каналу на приймальній стороні. Дані про параметри каналу надсилаються безпосередньо до пристрою декодування Аламоуті, який використовує цю інформацію для отримання оцінки каналу для кожного переданого корисного символу. Під час моделювання використовується бінарний генератор Бернуллі для створення випадкового двійкового сигналу, який подальше модулюється за допомогою різних методів, таких як бінарна фазова маніпуляція (BPSK), квадратурна фазова маніпуляція (QPSK) та 16-квадратурна амплітудна модуляція (16-QAM). Потім ці сигнали кодуються кодером Аламоуті та передаються каналом MIMO з релєївськими завмираннями та адитивним білим шумом.

На приймальній стороні декодер Аламоуті об'єднує сигнали, отримані від приймальних антен, у єдиний потік для проведення демодуляції. Після цього блок обчислення помилок порівнює демодульовані дані з вхідними для оцінки якості передачі. Такий підхід дозволяє ефективно передавати дані через канали MIMO, мінімізуючи вплив шуму та інших спотворень.

Під час моделювання систем зв'язку, таких як SISO (одна передавальна антена, одна приймальна антена), SIMO (одна передавальна антена, дві приймальні антени), MISO (дві передавальні антени, одна приймальна антена), MIMO  $2 \times 2$  (дві передавальні антени, дві приймальні антени), MIMO  $4 \times 4$  (чотири передавальні антени, чотири приймальні антени) і т.д., всі вихідні параметри, такі як частота дискретизації, методи модуляції, швидкість передавання та інші, обрані в повній відповідності зі стандартом системи радіозв'язку IEEE 802.16e.

Результати досліджень, виконаних відповідно [22], відображено на рисунку 3.1. Ці результати надають важливу інформацію щодо ефективності та продуктивності різних конфігурацій системи зв'язку залежно від їхньої архітектури та параметрів.

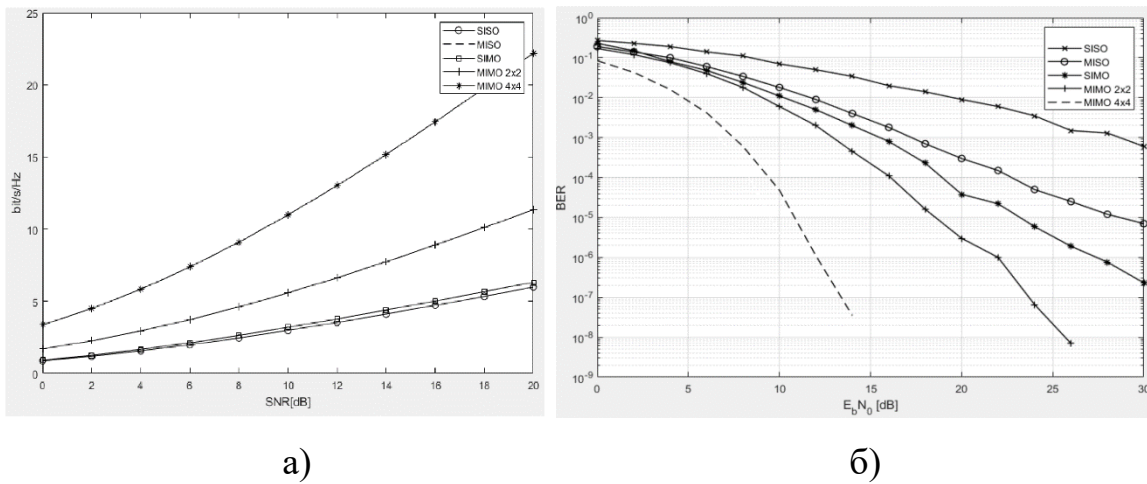


Рисунок 3.1 – Залежність пропускної здатності систем від відношення сигнал/шум (а) та імовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум для різних варіантів рознесення на прийомі та модуляція QPSK (б)

В бездротових системах зв'язку спостерігається помітний зріст швидкості передавання інформації лише при збільшенні кількості передавальних і приймальних антен. Наприклад, для досягнення ймовірності помилки на рівні  $10^{-4}$ , система SIMO переважає систему MISO, а система MIMO 2x2 виявляється кращою за систему SIMO. При цій самій ймовірності помилки виграв у завадостійкості системи MIMO 4x4 над системою MIMO 2x2 збільшується вдвічі і становить 6,5 дБ.

Порівняльний аналіз характеристик для варіантів з однією передавальною антеною і двома приймальними антенами (рознесення на прийомі) та з двома передавальними антенами та однією приймальною антеною (рознесення на передачі) показав, що рознесення на прийомі дозволяє отримати додатковий виграв у 3 дБ. Крім того, рознесення на прийомі та передачі дозволяє отримати ще 3 дБ додаткового виграву порівняно з рознесенням на прийомі. Отже, зі збільшенням кількості антен на передачі та прийомі покращується захищеність від завад.

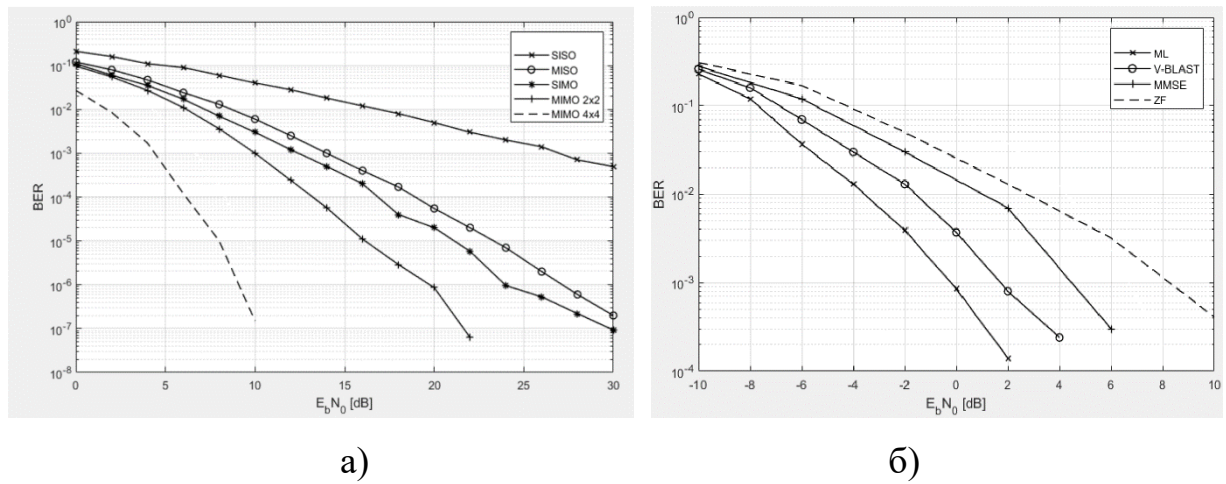


Рисунок 3.2 – Залежність імовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум для різних варіантів рознесення на прийомі та передачі (а) та імовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум за різними алгоритмами демодуляції (б)

Використання модуляції BPSK може значно поліпшити завадостійкість. Наприклад, для ймовірності помилки на рівні  $10^{-4}$ , система SIMO перевершує систему MISO на 3,2 дБ; система MIMO  $2 \times 2$  перевершує систему SIMO на 3,3 дБ; а система MIMO  $4 \times 4$  перевершує систему MIMO  $2 \times 2$  на 7 дБ. Крім того, додатковий вигреш в 3,2 дБ можна отримати за рахунок рознесення на прийомі, а рознесення на прийомі та передачі може забезпечити додатковий вигреш в 3,3 дБ. Збільшення кількості антен на передачі та прийомі також може покращити завадостійкість.

У MIMO-системах без зворотного зв'язку існують різні алгоритми обробки сигналів, які відрізняються способом поділу переданих символів у приймальних антенах. Деякі з основних алгоритмів включають метод зведення до нуля (Zero Forcing (ZF)), оцінку за мінімумом середньоквадратичної помилки (МСКО-приймач), максимально правдоподібну (МП) оцінку прийнятих символів (МП-приймач), а також алгоритм BLAST (Bell Laboratories Layered Space-Time) просторового декодування, зокрема, вертикальний BLAST (V-BLAST).

Для ймовірності помилки на рівні  $10^{-3}$ , відношення сигнал/шум при демодуляції алгоритмом МП становить 0 дБ; алгоритмом V-BLAST – 1,8 дБ; алгоритмом МСКО – 4,5 дБ; алгоритмом ZF - 8,2 дБ. З цих даних випливає, що алгоритм МП має найменше значення ймовірності помилки порівняно з іншими, що свідчить про його кращі властивості завадостійкості. З іншого боку, алгоритм МСКО не поступається в завадостійкості іншим, але має меншу обчислювальну складність.

Дослідження показали, що просторово-часове кодування успішно поєднує переваги методів просторового рознесення з можливостями виправлення помилок коригувальним кодом, застосовуючи оптимальні алгоритми декодування. Це дозволяє використовувати оптимальний алгоритм об'єднання рознесених сигналів, що значно підвищує ефективність систем передачі даних. Проте ефективність цих досліджень та розроблених методів просторово-часового кодування значною мірою залежить від того, наскільки моделі каналів відповідають реальним умовам передачі.

Зокрема, просторово-часові блокові коди забезпечують великий обсяг рознесення за рахунок можливості використання багатьох антен, але мають обмежений вигаш від рознесення через обмежену кількість антен. Можливість подальшого підвищення завадостійкості решітчастих просторово-часових кодів стає можливою за умови використання нових перспективних класів кодів, таких як рекурсивні згорткові коди.

Застосування просторово-часового кодування у Wi-Fi-мережах виявляє значний потенціал для підвищення швидкодії передачі даних та покращення якості зв'язку. На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Ефективне використання ресурсів - просторово-часове кодування дозволяє оптимально використовувати доступні антени та ресурси каналу, що сприяє підвищенню пропускної здатності мережі.

2. Зменшення впливу завад - застосування методів рознесення та оптимальних алгоритмів декодування дозволяє зменшити вплив завад та сприяє підвищенню завадостійкості системи.

3. Покращення відношення сигнал/шум - просторово-часове кодування сприяє покращенню відношення сигнал/шум, що важливо для забезпечення якості зв'язку та збільшення дальності передачі даних.

4. Підвищення пропускної здатності - використання методів рознесення та оптимальних алгоритмів дозволяє збільшити пропускну здатність мережі, що дозволяє передавати більше даних за один часовий інтервал.

Отже, використання просторово-часового кодування у віфі-мережах є перспективним підходом для підвищення швидкодії передачі даних, покращення якості зв'язку та забезпечення ефективного використання ресурсів мережі [34].

Застосування просторово-часового кодування в системах Wi-Fi зв'язку підтверджується теоретичним аналізом та результатами моделювання. Воно дозволяє зменшити вплив завмирання на сигнали та покращити якість і пропускну здатність систем. При використанні методів рознесення спостерігається покращення відношення сигнал/шум до десяти децибелів, що свідчить про перевагу цієї технології для систем зв'язку, які потребують підвищення пропускної здатності та ергодичної ємності.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було досліджено методи поліпшення завадостійкості та збільшення швидкості передачі даних у Wi-Fi-мережах з метою впровадження в існуючі системи та при проектуванні нових.

Проведено аналіз стандартів та особливостей роботи сучасних Wi-Fi-мереж, їх структура та топології, а також проблеми та недоліки бездротових мереж, крім того, розглянуто особливості кодування та модуляція у Wi-Fi-мережах.

Запропоновано використання двох методів: метод вдосконалення Wi-Fi мережи з урахуванням ЕМС та метод вдосконалення Wi-Fi мережи за допомогою ПЧК.

Метод вдосконалення Wi-Fi мереж з урахуванням електромагнітної сумісності (ЕМС) є критично важливим для підвищення ефективності та надійності безпроводових з'єднань. Врахування ЕМС при проектуванні мереж дозволяє мінімізувати вплив внутрішніх та зовнішніх перешкод, що суттєво покращує завадостійкість та стабільність роботи мережі.

Застосування програмних засобів, таких як бездротові аналізатори протоколів і сніфери, дозволяє збирати детальні дані про трафік і стан мережі, що дає можливість вчасно виявляти та усувати проблеми. Це також сприяє оптимізації налаштувань для підвищення швидкості передачі даних та покращення загальної продуктивності мережі.

Урахування ЕМС при проектуванні та експлуатації Wi-Fi мереж забезпечує більш високу якість зв'язку, знижує ймовірність втрат пакетів і покращує користувацький досвід. Усе це робить метод вдосконалення Wi-Fi мереж з урахуванням ЕМС необхідним кроком для забезпечення надійної та високопродуктивної інфраструктури.

Використання методу просторово-часового кодування (ПЧК) для вдосконалення Wi-Fi мереж має значні переваги в підвищенні завадостійкості

та швидкості передачі даних. ПЧК дозволяє використовувати множинні антени для одночасної передачі різних частин сигналу, що значно покращує якість зв'язку.

По-перше, ПЧК підвищує стійкість до завад, оскільки сигнали, передані через різні антени, досягають приймача по різних шляхах. Це дозволяє компенсувати вплив перешкод і зменшити ймовірність втрати даних. У результаті, навіть у складних умовах з високим рівнем електромагнітних завад, мережа може забезпечувати стабільне та надійне з'єднання.

По-друге, ПЧК сприяє збільшенню швидкості передачі даних. Використання множинних антени дозволяє передавати більше інформації за той самий час, що значно підвищує пропускну здатність мережі. Це особливо важливо для додатків, які вимагають високої швидкості передачі даних, таких як потокове відео або онлайн-ігри.

Крім того, ПЧК може забезпечити кращу продуктивність у мережах з високою щільністю користувачів. Зниження рівня колізій і покращення ефективності використання спектра частот дозволяє обслуговувати більше користувачів без зниження якості зв'язку.

Таким чином, застосування просторово-часового кодування є ефективним методом вдосконалення Wi-Fi мереж. Враховуючи його здатність підвищувати завадостійкість і збільшувати швидкість передачі даних, ПЧК є важливим інструментом для оптимізації продуктивності та надійності безпроводових мереж.

У кваліфікаційній роботі проведені експериментальні дослідження запропонованих методів які підтверджують їх ефективність.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. The importance of terrestrial wireless communications [Електронний ресурс] Mario Maniewicz // International Telecommunication Union – Режим доступу: [https://www.itu.int/en/itu-news/Documents/2019/2019-04/2019\\_ITU\\_News04-en.pdf](https://www.itu.int/en/itu-news/Documents/2019/2019-04/2019_ITU_News04-en.pdf) (дата звернення 11.04.2024)
2. IEEE 802.11 «Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications» [Електронний ресурс] IEEE // Режим доступу: DOI:10.1109/ieeestd.2016.7786995 (дата звернення 11.04.2024)
3. Wi-Fi global economic value to reach \$5 trillion in 2025 [Електронний ресурс] Wi-Fi Alliance // Режим доступу: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-global-economic-value-to-reach-5-trillion-in-2025> (дата звернення 01.03.2024)
4. Європейський інститут телекомунікаційних стандартів [Електронний ресурс] ETSI // Режим доступу: <https://www.etsi.org> (дата звернення 05.03.2024)
5. Tanenbaum A.S. Computer Networks / A.S. Tanenbaum, D.J. Wetherall. – 5-th Ed. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 p.
6. IEEE 802.11g, «Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band» [Електронний ресурс] IEEE // Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1210624> (дата звернення 12.04.2024)
7. Bellalta B. IEEE 802.11 ax: High-efficiency WLANs / Boris Bellalta / IEEE Wireless Communications. - 2016. - №23(1). - P. 38–46
8. Shahwaiz Afaqui M. IEEE 802.11 ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi / M. Shahwaiz Afaqui, E.G.Villegas, E.L. Aguilera / IEEE Wireless Communications. – 2016.- №99. – P. 2–9
9. Survey and Performance Evaluation of the Upcoming Next Generation WLAN Standard-IEEE 802.11 ax [Електронний ресурс] Qiao Qu, Bo Li, Mao

Yang et al./ – Режим доступу: – <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1806/1806.05908.pdf> (дата звернення: 14.04.2024)

10. Ткаченко О.М. Особливості створення мережевої інфраструктури великого підприємства / О.М. Ткаченко, А.В. Лемешко, Д.В. Кращенко, Р.С. Кадюк, Т.М. Стельмах // Наукові записки УНДІЗ. – 2019. – №3(55). – С.12-18.

11. Potential and pitfalls of multi- armed bandits for decentralized spatial reuse in WLANs [Електронний ресурс] Francesc Wilhelmi, Sergio Barrachina-Munoz, Boris Bellalta et al. / – Режим доступу: – <https://arxiv.org/pdf/1805.11083.pdf> (дата звернення: 10.03.2024)

12. Shen Z. Research and Performance Evaluation of Spatial Reuse Technology for Next Generation WLAN / Zhao Shen, Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Xiaobo Li, Yi Jin // International Wireless Internet Conference. - 2019. - P.41– 51.

13. Jamil I. Novel learning-based spatial reuse optimization in dense WLAN deployments / Imad Jamil, Laurent Cariou, Jean-François Hélar / EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. - 2016. - №1. - P. 184

14. Chi-Kin Chau. Effective static and adaptive carrier sensing for dense wireless CSMA networks / Chi-Kin Chau, Ivan WH Ho, Zhenhui Situ, Soung Chang

15. Collaborative spatial reuse in wireless networks via selfish multi-armed bandits [Електронний ресурс] Francesc Wilhelmi, Cristina Cano, Gergely Neu et al. / – Режим доступу: – <https://arxiv.org/pdf/1710.11403.pdf>: 12.03.2024)

16. Shahwaiz Afaqui M. Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE 802.11 ax / Shahwaiz Afaqui, Eduard Garcia-Villegas, Elena Lopez-Aguilera, Graham Smith, Daniel Camps // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – 2015.- P.1060–1065

17. The combination of QoS, aggregation and RTS/CTS in Very High Throughput IEEE 802.11ac networks [Електронний ресурс] Oran Sharona and Yaron Alpert / – Режим доступу: <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.physcom.2015.01.003> (дата звернення: 16.03.2024)

18. Bletskan D. I., Glukhov K. E., Frolova V. V. Electronic structure of 2H-

SnSe<sub>2</sub>: ab initio modeling and comparison with experiment. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2016. Vol. 19, No 1. P. 98–108.

19. Feher K. *Wireless digital communications / New Jersey.: Prentice-Hall PTR*. 1999. – 520p.

20. Foschini G. Layered space – time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antennas // *Bell Laboratories Technical Journal*. – 1996. – Vol. 4, Autum. – P. 41–59.

21. Gesbert D. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space – Time Coded Wireless Systems / Gesbert D., Shafi M., Shiu D., Smith P., Naguib A. // *IEEE Journal on selected areas in communications*.– 2003.– Vol. SAC - 21, No.3. – P. 281–302.

22. Banket V.L. Downlink Processing Algorithms for Multi-Antenna Wireless Communications / Banket V.L., Dakdouki A.S., Myckhailov N.K., Skopa A. // *IEEE Communications Magazine*. – 2005. No.1 – P. 45–48.

23. Іщенко М.О. Сигнально-кодові конструкції для систем безпроводового зв'язку з просторово-часовим кодуванням: Автореф. дис. к.т.н. / ОНАЗ. – Одеса, 2009. – 150 с.

24. Erceg V. Channel models for fixed wireless applications // *IEEE Tech.Report, IEEE 802.16 Work Group*, 2001.

25. Wang D. Super - Ortogonal Differential Trellis Coding and Decoding / Wang D., Xia X.; *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* – 2003 – Vol. 23, No.9. – P. 1768–1798.

26. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications / *IEEE J. Select. Areas Communication*. –Vol. 16. No. 8.– 1998. – P. 1451–1458.

27. Calderbank A.R. Space-Time Block Coding from Orthogonal Designs / Calderbank A.R Tarokh V., Jafarkhani H.; *IEEE Trans. on Inform. Theory*. – 1999. – Vol. 45. – No. 5. – P. 1456–1467.

28. Hohnwald B. Systematic Design of Unitary Space - Time Constellations / HohnwaldB., Marzetta T. *IEEE Trans. on Inform. Theory*. – 2000. – Vol. 46. – No.

6. – P. 1962–1973.

29. Calderbank R. Space-time coding and signal processing for high data rate wireless communications / Calderbank R., Naguib A. *Wireless; Communications and Mobile Computing*. – 2001. – No.1. – P. 13–34.

30. Lau B. K., Ow S. M. S., Kristensson G., Molisch A. F. Capacity Analysis for Compact MIMO Systems [Текст] // *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) (ISSN; 1550-2251)*. – IEEE Xplore, 2005. – Vol. 1. – P. 165–170.

31. Shcherbina A.A., Effect of antenna mutual coupling on MIMO channel capacity [Текст]/ V. G Lykhograi // *IX International Conference on Antenna Theory and Tech-niques (ICATT-2013)*, Odesa, Ukraine 16-20 September 2013, p. 178–180.

32. Erceg V. Channel models for fixed wireless applications // *IEEE Tech.Report, IEEE 802.16 Work Group*, 2003.

33. Мохаммед, М. and Водічев, В. 2023. MODELING OF MIMO SYSTEMS WITH UNIVERSAL CONTROLLER. *Electrotechnic and Computer Systems*. 37 (113) (Sep. 2023), 26-32. DOI:<https://doi.org/10.15276/eltecs.37.113.2023.03>.

34. Mogylevych, D. and Pogrebniak, L. 2023. Analytical model OFDM-MIMO signal in a radio channel with frequency-time selective fading. *Collection "Information Technology and Security"*. 11, 1 (Jun. 2023), 39–46. DOI:<https://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.1.283538>.

35. Радченко С., Піскарьов О., Юрченко Т., Тимчук С., Баранова І., Поліпшення завадостійкості та збільшення швидкості передачі даних у Wi-Fi-мережах. *Інформаційні технології та суспільство. Науковий журнал*. Випуск 1 (12). - Київ: МАУП, - 2024. - С. (прийнята до друку).

36. Піскарьов О.М., Юрченко Т.А. Огляд технологій поліпшення завадостійкості у Wi-Fi-мережах // *Збірка матеріалів міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої світи і молодих вчених "Інформаційні технології у сучасному світі"*. - Харків: ДБТУ. 2024. – С. 212-215.