

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТСМ-23м
спеціальності 172 – Електронні комунікації
та радіотехніка

Онищук Онищук Д.О.

Керівник: к.т.н., професор каф. ІКСТ
Барась Барась С. Т.

« 16 » 12 2024 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Семенов Семенов А.О.

« 16 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 16 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань - 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

(шифр і назва)

Спеціальність - 172 – Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“24” 09 2024 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Онищуку Денису Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах
керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “17” 09 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року

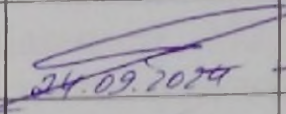
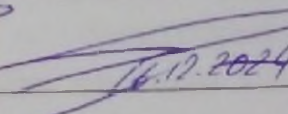
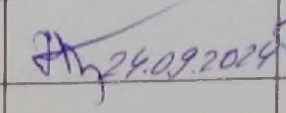
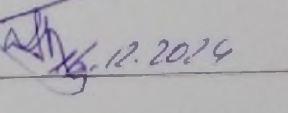
3. Вихідні дані до роботи: втрата ефективності сигналу Wi-Fi при різних перешкодах – до 25 дБ; зменшення потужності сигналу при перевідбитті – 10-12 дБ; робочі частоти стандартів 802.11 – 2,4 та 5 ГГц та близько 1 ГГц для Wi-Fi HaLow; адаптація стандартів 802.11n, ac, ax, ah, s; агрегація каналів 20, 40, 80 та 160 МГц; технології OFDM та MIMO, beamforming та mesh-мережі.

4. Зміст текстової частини: 1. Аналіз типових промислових середовищ в контексті функціонування мережі Wi-Fi. 2. Дослідження технологій Wi-Fi, адаптованих до промислових середовищ. 3. Прикладна оцінка стандартів Wi-Fi.

4. Економічна частина.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Втрати ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища. Спотворення сигналу під впливом міжсимвольної інтерференції. Спотворення спектру сигналу при відбитті від перешкод. Структурна схема формувача OFDM-радіосигналу з блоком ЗДПФ та пояснення принципу його формування. Пояснення технології beamforming. Розподіл каналів у сегментах діапазону. Зміна інтервалу між несущими OFDM-сигналу в стандарті 802.11ax. Порівняння пропускної здатності 802.11n/ac і 802.11ah залежно від дальності дії.

6. Консультанти розділів роботи

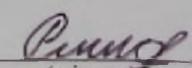
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 24.09.2024	 16.12.2024
Економічна частина	Бурелікова Н. В. д.в.н., професор кафедр ЕПВМ	 24.09.2024	 16.12.2024

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

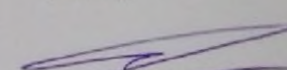
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	09.09.2024р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	16.09.2024р.	
3.	Аналіз типових промислових середовищ в контексті функціонування мережі Wi-Fi	12.10.2024р.	
4.	Дослідження технологій Wi-Fi, адаптованих до промислових середовищ	30.10.2024р.	
5.	Прикладна оцінка стандартів Wi-Fi	11.11.2024р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	22.11.2024р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.12.2024р.	
8.	Нормоконтроль МКР	06.12.2024р.	
9.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2024р.	
10.	Захист МКР ЕК	18.12.2024р.	

Студент


(підпис)

Онищук Д.О.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Онищук Д. О. Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 119 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 17 назв; рис.: 33; табл. 17.

Робота присвячена дослідженню можливих варіантів побудови мережі широкосмугового доступу Wi-Fi в промислових середовищах, для яких важливим є: масштаб мережі, управління трафіком, безпека, велика кількість користувачів, наявність значної кількості дестабілізуючих факторів з різноманітним ступенем впливу тощо.

Метою дослідження є удосконалення структури та алгоритмів роботи мережі Wi-Fi у промисловому середовищі. Магістерська робота містить аналіз типових промислових середовищ в контексті впливу на функціонування Wi-Fi, а також дослідження найбільш прогресивних технологій Wi-Fi, адаптованих до надійної та ефективної роботи у таких умовах. Виконано прикладну оцінку найсучасніших стандартів Wi-Fi та дана оцінка методів збільшення швидкості передачі інформації з їх використанням.

Робота містить чотири розділи. У першому розділі виконано аналіз типових промислових середовищ в контексті функціонування мережі Wi-Fi.

У другому розділі досліджені технології Wi-Fi, адаптовані до промислових середовищ.

У третьому розділі дана прикладна оцінка стандартів Wi-Fi, які можуть бути рекомендовані для мереж у промислових умовах.

У четвертому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи.

ABSTRACT

Onishchuk D. O. Building a Wi-Fi network in industrial environments. Master's qualification work in specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 119 p.

In Ukrainian. Bibliography: 17 titles; fig.: 33; tab. 17.

The work is devoted to the study of possible options for building a Wi-Fi broadband access network in industrial environments, for which the following are important: network scale, traffic management, security, a large number of users, the presence of a significant number of destabilizing factors with varying degrees of influence, etc.

The purpose of the study is to improve the structure and algorithms of the Wi-Fi network in an industrial environment. The master's thesis contains an analysis of typical industrial environments in the context of the impact on the functioning of Wi-Fi, as well as a study of the most advanced Wi-Fi technologies adapted to reliable and efficient operation in such conditions. An applied assessment of the most modern Wi-Fi standards is performed and an assessment of methods for increasing the speed of information transmission using them is given.

The work contains four sections. The first section analyzes typical industrial environments in the context of the functioning of a Wi-Fi network.

The second section studies Wi-Fi technologies adapted to industrial environments.

The third section provides an applied assessment of Wi-Fi standards that can be recommended for networks in industrial conditions.

The fourth section provides an economic justification for the feasibility of implementing this research work.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ТИПОВИХ ПРОМИСЛОВИХ СЕРЕДОВИЩ В КОНТЕКСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖІ Wi-Fi	9
1.1 Загальна характеристика умов роботи мережі Wi-Fi у промисловому середовищі	9
1.2 Дестабілізуючі фактори для мережі Wi-Fi	12
1.3 Обмеження швидкості передачі інформації у мережах Wi-Fi	17
1.3.1 Вплив багатопроменевої інтерференції	18
1.3.2 Вплив частотно-залежного згасання	19
1.3.3 Доплерівський ефект – вплив руху пристроїв	20
1.4 Методи збільшення швидкості передачі інформації	21
1.5 Висновки до розділу.....	26
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ Wi-Fi, АДАПТОВАНИХ ДО ПРОМИСЛОВИХ СЕРЕДОВИЩ.....	29
2.1 Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів..	29
2.2 Огляд технології MIMO	38
2.2.1 Режими роботи станцій MIMO	39
2.2.2 Фактори збільшення швидкості передачі даних	43
2.2.3 MIMO-канал	45
2.2.4 Обробка сигналів на приймальній стороні MIMO системи	47
2.2.5 Методи просторово-часового кодування MIMO	47
2.3 Технологія Mesh-мереж	50
2.4 Технології BSS Coloring, TWT, beamforming	57
2.5 Висновки до розділу	63
3 ПРИКЛАДНА ОЦІНКА СТАНДАРТІВ Wi-Fi	65
3.1 Промисловий Wi-Fi: раціональні рішення для організації мереж передачі даних	65
3.2 Стандарти Wi-Fi для промислових середовищ	69
3.2.1 Стандарт 802.11n (Wi-Fi 4)	69

	3
3.2.2 Стандарт 802.11ac (Wi-Fi 5)	74
3.2.3 Стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6)	81
3.2.4 Стандарт 802.11ah (Wi-Fi HaLow)	85
3.2.5 Стандарт 802.11s (Wi-Fi Mesh)	87
3.3 Висновки до розділу	88
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	89
4.1 Оцінювання наукового ефекту.....	89
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	92
4.2.1 Витрати на оплату праці.....	93
4.2.2 Відрахування на соціальні заходи.....	95
4.2.3 Сировина та матеріали.....	96
4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	98
4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт.....	98
4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт.....	98
4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	99
4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	101
4.2.9 Службові відрядження.....	101
4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	102
4.2.11 Інші витрати.....	102
4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	102
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	104
4.4 Висновки до розділу.....	105
ВИСНОВКИ	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108
Додаток А (обов'язковий) - Ілюстративний матеріал	110
Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	118

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AP – Access Point (точка доступу)

BLAST – Bell Labs Space-Time Transformation (неортогональний метод просторово-часового кодування)

BPSK – Binary phase-shift keying (двійкова фазова маніпуляція)

BSS Coloring – Basic Service Set Coloring (технологія маркування пакетів у каналах з метою розпізнавання "свій-чужий")

CDMA – Code Division Multiple Access (система множинного доступу із кодовим розділенням)

CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (метод доступу з часовим розділенням)

D-BLAST – алгоритм BLAST з діагональним розподілом часових слотів

FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum (псевдовипадкова перебудова робочої частоти)

GI – Guard Interval (захисний інтервал)

HWMP – Hybrid Wireless Mesh Protocol (гібридний протокол маршрутизації в Mesh-мережі)

IDFT – Inverse Discrete Fourier Transform (зворотне дискретне перетворення Фур'є)

ISI – inter symbol interference (міжсимвольна інтеференція)

MCS – Modulation and Coding Scheme (індекс модуляції та схеми кодування)

MDA – Mesh Deterministic Access (детермінований доступ до mesh-мережі)

MIMO – Multiple Input Multiple Output (системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами)

ML – Maximum Likelihood (метод максимальної правдоподібності)

MU-MIMO – Multi-User Multiple Input Multiple Output (багатокористувальницька технологія з декількома входами)

NAV – (віртуальна зайнятість середовища)

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiple (ортогональне частотне розділення з мультиплексуванням)

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access (багатокористувальницька версія цифрової модуляції OFDM)

QAM – Quadrature Amplitude Modulation (квадратурно-амплітудна модуляція)

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying (квадратурна фазова маніпуляція)

RSSI – Received Signal Strength Indication (показник рівня потужності сигналу)

SISO - Single Input Single Output (система з одним входом і одним виходом)

STA – Stations (безпроводні станції)

SU-MIMO – Single-User Multiple Input Multiple (однокористувальницька система)

TIM – Traffic Identification Message (періодичне сповіщення)

TWT – Target Wake Time (цільовий час пробудження)

U-APSD – Unscheduled-Automatic Power Save Delivery (автоматичне відключення радіомодулів безпроводних адаптерів)

V-BLAST – алгоритм BLAST з вертикальним розподілом слотів

WAP – Wireless Access Point (точка безпроводного доступу)

WEP – Wired Equivalent Privacy (стандарт захисту безпроводного трафіку, заснований на алгоритмі потокового шифрування RC4)

WMN — Wireless Mesh Networks (безпроводна комірчаста мережа)

WPA – Wired Equivalent Privacy (стандарт безпроводного шифрування)

ZF – zero forcing (метод обнулення)

ДТС – діаграмотворча схема

ЕПТ – електронно-променева трубка

ЗДПФ – зворотне дискретне перетворення Фур'є

КАМ – квадратурно-амплітудна модуляція

МСКО – метод мінімальних середньоквадратичних відхилень

НВЧ – надвисокі частоти

Актуальність теми. Сьогодні все більше компаній розгортають свої корпоративні мережі Wi-Fi у комплексному виконанні, і таке рішення завжди виправдовує себе. Отримати від бездротової корпоративної мережі переваги та зручності можна лише у тому випадку, якщо будувати її за правилами. При грамотній побудові бездротова мережа дає можливість [1-4]:

- бути присутнім по всій території підприємства (там, де передбачається її наявність);
- складати конкуренцію провідної передачі інформації завдяки сучасним технологіям, які підвищують швидкість трафіку в бездротовій мережі;
- забезпечувати надійний захист корпоративних даних від зловмисників.

Мережа Wi-Fi дає компанії переваги та зручності в частині збільшення загальної продуктивності праці та мобільності співробітників разом з безперебійним доступом до інформації в будь-якій точці офісу або навіть за його межами. Вона дозволяє зменшити витрати за рахунок зручності, легкості в обслуговуванні та більш ефективного використання простору приміщень та відсутності проводів, надає можливість легко та швидко підключитися до інтернету гостям та клієнтам, забезпечує розширюваність сервісів та послуг: сьогодні – для співробітників, завтра – для промислового обладнання, IoT тощо.

Використання безпроводної мережі на підприємствах - це один з напрямків впровадження автоматизації та інноваційних технологій не лише у суспільну сферу життя, а й роботу підприємств, компаній тощо. Розгортання мережі Wi-Fi залежить від бюджету організації та її потреб [3-5]. При цьому важливо розуміти, що не існує межі розвитку, і те, що раніше вважалося високотехнологічним чи інноваційним, тепер стає невід'ємною частиною нашого життя.

Бездротові мережі надають великий обсяг інформації для клієнтів. Але слід зазначити, що для побудови якісної мережі необхідні аналітичні засоби, які дають можливість зрозуміти, як працюють програми, хто, як і звідки підключається до мережі, яка якість з'єднання у мережі, які дестабілізуючі фактори існують на конкретній території. Таким чином при побудові мережі Wi-

Fi у промислових умовах використовується комплексний підхід, який дозволяє IT-фахівцям бачити кожен точку доступу окремо та загальну картину, а також у дистанційному режимі визначати та усувати несправності в мережі. У цьому контексті важливо визначити умови, в яких повинна працювати мережа.

При розгортанні корпоративних мереж Wi-Fi має місце орієнтація на такі стандарти Wi-Fi: 802.11n, 802.11ac, 802.11ax, 802.11ah, 802.11s.

Аналіз останніх досліджень. У напрямку адаптації Wi-Fi до промислових умов працюють протоколи керування трафіком, протоколи безпеки, протоколи автоматичного налаштування та керування, які дозволяють спростити розгортання та керування великими промисловими Wi-Fi мережами.

Технологія Wi-Fi добре зарекомендувала себе під час роботи як з мобільними пристроями, так і з різноманітними засобами автоматизації бізнес-процесів. Сучасні технології вимагають інтеграції різних систем між собою для вирішення поставлених завдань і Wi-Fi не є винятком. Сучасні дослідження стосуються удосконалення алгоритмів роботи та підвищення продуктивності. Напрямки досліджень [5-7]:

- технологія MU-MIMO, яка реалізує одночасну передачу даних кільком користувачам, що підвищує ефективність мережі при високому завантаженні;
- beamforming - дозволяє спрямовувати сигнал Wi-Fi у певний напрямок, покращуючи дальність та стабільність з'єднання, особливо в умовах із високим рівнем завад або в обмежених просторах;
- mesh-мережі - ця технологія дозволяє створювати розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла;
- енергозощадні технології.

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є удосконалення структури та алгоритмів роботи мережі Wi-Fi у промисловому середовищі.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз типових промислових середовищ в контексті впливу на функціонування Wi-Fi;
- дослідження технологій Wi-Fi, адаптованих до промислових середовищ;

- прикладна оцінка стандартів Wi-Fi;
- оцінка методів збільшення швидкості передачі інформації;
- аналіз економічної ефективності досліджень.

Об'єктом дослідження є процеси формування, передачі, прийому та обробки сигналів у Wi-Fi системах, що працюють за адаптованими до промислових середовищ стандартами.

Предметом дослідження є методи та засоби, які забезпечують формування сигналів у безпроводних системах зв'язку.

Методи досліджень базуються на використанні: теорії поширення електромагнітних хвиль для аналізу сигнальної обстановки на вході приймальної антени, теорії ортогональних сигналів для оцінки рівня міжканальної інтерференції, теорії антенних систем для аналізу ефективності технологій управління характеристиками спрямованості.

Новизна одержаних результатів:

а) вперше запропоновано спиратися на стандарти, які використовують технологію beamforming, що дозволяє спрямовувати сигнал Wi-Fi у певний напрямок, покращуючи дальність та стабільність з'єднання, особливо в умовах із високим рівнем завад або в обмежених просторах;

б) запропоновано у промислових середовищах створювати розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла - mesh-мережі.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на LIII науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2024 році.

1 АНАЛІЗ ТИПОВИХ ПРОМИСЛОВИХ СЕРЕДОВИЩ В КОНТЕКСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖІ Wi-Fi

1.1 Загальна характеристика умов роботи мережі Wi-Fi у промисловому середовищі

Велика кількість користувачів, високі вимоги до надійності, безпека мережі, наявність значної кількості дестабілізуючих факторів з різноманітним ступенем впливу тощо – це особливості роботи Wi-Fi у промисловому середовищі. Охарактеризуємо їх у загальних рисах [3-5].

1. Масштаб мережі. Підприємства мають зазвичай велику кількість користувачів та значну площу території. Це вимагає масштабованої Wi-Fi інфраструктури, яка б забезпечила повне покриття та підтримувала стабільне з'єднання для всіх пристроїв.

2. Управління трафіком. На підприємстві може бути багато різних типів трафіку - хмарні програми, потокове відео, голосовий та відеозв'язок тощо. Розподіл та управління пріоритетами трафіку є важливими аспектами при побудові мережі.

3. Безпека. Wi-Fi мережі повинні бути захищені від несанкціонованого доступу та шкідливих атак. Для цього використовують шифрування, системи виявлення вторгнень, автентифікацію користувачів, брандмауери та інші заходи безпеки.

4. Сумісність із пристроями. На підприємстві можуть використовувати різні пристрої: ноутбуки, планшети, смартфони тощо. Wi-Fi інфраструктура має підтримувати різні стандарти Wi-Fi та бути сумісна з різними типами пристроїв.

У промислових умовах Wi-Fi мережі стикаються з низкою проблем та викликів (дестабілізуючих факторів), які можуть суттєво ускладнити їхню роботу. Наведемо деякі з них.

1. Електромагнітні завади, які є наслідком високої концентрації різних типів устаткування, машин і металевих конструкцій. Їх електромагнітні

випромінювання можуть призвести до інтерференції з Wi-Fi сигналом, наслідком якого стає падіння швидкості передачі даних та можлива втрата з'єднання. Через високу концентрацію електромагнітних завад від обладнання та машин потрібний вищий ступінь завадозахищеності та здатності до корекції помилок у Wi-Fi мережі, що розгорнута в промисловому середовищі.

2. Висока щільність пристроїв. Уже зазначалось, що в промислових середовищах може бути велика кількість підключених до Wi-Fi пристроїв. Це створює конкуренцію за доступ до каналів зв'язку і може призвести до навантаження мережі. За таких умов мережа Wi-Fi повинна забезпечувати більш високу пропускну здатність та керування трафіком для забезпечення стабільної роботи всіх користувачів.

3. Фізичні перешкоди. Стіни, металеві конструкції, обладнання тощо - це фізичні перешкоди у промислових приміщеннях, які можуть суттєво обмежити дальність і якість Wi-Fi сигналу. Це означає, що потрібні більш потужні пристрої та відповідні антени для забезпечення повного покриття.

4. Високі вимоги до продуктивності. У багатьох промислових додатках потрібна висока продуктивність Wi-Fi мереж передачі великих обсягів даних у реальному часі, таких як відеоспостереження, медичні системи, системи автоматизації тощо.

5. Складність управління та моніторингу. Архітектурні особливості промислових об'єктів визначають часто складну топологію промислової мережі, що визначає високі вимоги до управління та моніторингу. Під час налаштування та обслуговування Wi-Fi інфраструктури це може стати проблемою для адміністраторів мережі.

Для адаптації Wi-Fi мереж до промислових умов з зазначеними проблемами та викликами потрібні спеціальні рішення та технології. До таких слід віднести: розгортання мереж Mesh, використання завадостійких модуляцій, застосування засобів керування трафіком та безпеки, а також оптимізація продуктивності мережі.

Очевидно промислові середовища бувають різні. Вони мають різну архітектуру, різне обладнання, займають різну територію тощо. Наведемо типові промислові середовища та особливості їхньої інфраструктури.

1. Виробничі підприємства. Займають значну територію з різними зонами: виробничі цехи, складські приміщення, офісні будинки тощо. Характеризуються високою концентрацією обладнання та машин, що створює електромагнітні завади. Wi-Fi мережі працюють в умовах високої завантаженості та потребують забезпечення хорошої надійності.

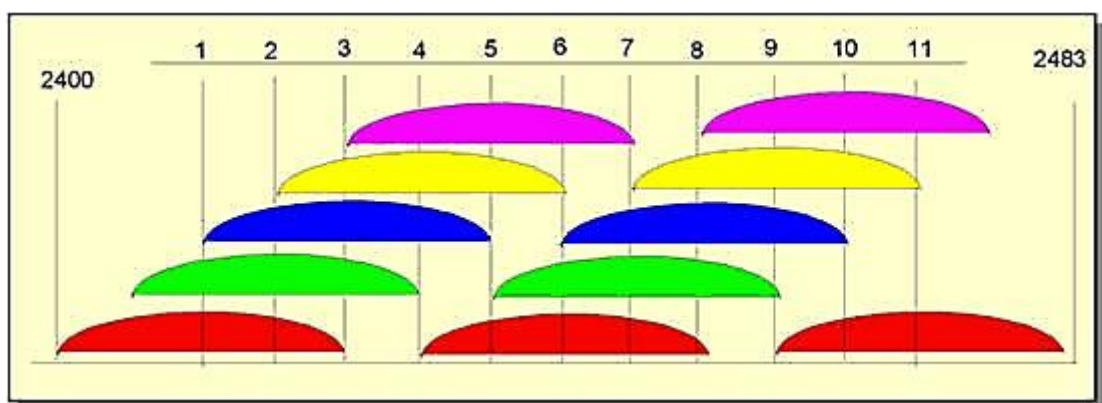
2. Склади та логістичні центри. Вимагають широкого покриття сигналу Wi-Fi на всій території складу. Можлива наявність металевих конструкцій та великої кількості вантажів, що може створювати перешкоди для безпроводного зв'язку.

3. Нафтогазові та хімічні підприємства. До особливостей слід віднести безпеку мережі через потенційну небезпеку вибухів та хімічних витоків, а також високі вимоги до надійності мережі в умовах високих температур, агресивного середовища та вібрацій.

4. Транспортні вузли (аеропорти, залізничні станції). Насамперед, можлива велика кількість рухомих об'єктів, що створює додаткові виклики для підтримки безперервного зв'язку. У такому середовищі потрібна висока продуктивність мережі для забезпечення зв'язку із системами керування транспортом, інформаційними табло, квитковими автоматами тощо.

5. Промислові ділянки та заводи. У таких середовищах використання Wi-Fi необхідне для моніторингу та управління процесами виробництва та обладнання. Вимагають високої надійності мережі в умовах підвищеного рівня шуму та вібрацій від обладнання.

З вищенаведеного випливає достатньо широкий спектр промислових середовищ та умов функціонування у них мережі Wi-Fi. Очевидно, що адаптація Wi-Fi до промислових умов потребує врахування конкретних особливостей кожного підприємства чи об'єкта. У цьому контексті основне завдання для даної роботи – окреслити якомога ширше всю проблематику побудови мережі



У технології Wi-Fi частотний обмін між точкою доступу та клієнтом здійснюється через радіохвилі, використовуючи метод, який називається "поділом частотного спектру". Це відбувається таким чином.

1. Вибір частотного діапазону. Wi-Fi, як уже зазначалось, використовує два основних діапазони частот: 2,4 ГГц та 5 ГГц. Кожен із цих діапазонів поділений на канали. Наприклад, у діапазоні 2,4 ГГц є 11 каналів, які накладаються один на одного, а в діапазоні 5 ГГц більше каналів, і вони рідше перекриваються.

2. Розподіл каналів. Кожен канал має певну ширину (зазвичай 20 МГц, 40 МГц, 80 МГц або 160 МГц), що визначає обсяг даних, що передаються. Точка доступу та клієнт «домовляються» про те, по якому каналу буде здійснюватися зв'язок. Це відбувається через процес, який називається "сканування та вибір каналу".

3. Процес зв'язку. Коли клієнт (наприклад, смартфон або ноутбук) намагається підключитися до точки доступу, відбувається обмін сигналами. Спочатку клієнт виконує сканування доступних мереж та знаходить точку доступу. Після цього клієнт та точка доступу обмінюються керуючими кадрами (management frames), щоб узгодити параметри зв'язку, включаючи частотний канал та тип захисту.

4. Метод доступу до середовища. Wi-Fi використовує метод доступу з часовим розділенням, так званий CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Перед початком передачі даних точка доступу та клієнт "слухають" канал, щоб переконатися, що він вільний. Якщо канал є вільним, вони починають передачу. Якщо канал зайнятий, вони чекають деякий час і пробують знову. Це допомагає уникнути колізій.

5. Передача даних. Коли передача даних починається, точки доступу та клієнти використовують різні кадри для передачі даних та управління (наприклад, дані, підтвердження, керування потоком). Вони використовують радіочастоти передачі цих кадрів у вибраному каналі.

6. Динамічне керування частотами. Для покращення продуктивності та зменшення завад іноді використовується динамічна зміна каналів. Точка доступу

та клієнт можуть «домовитися» про зміну каналу, якщо поточний канал перевантажений або виникають завади.

7. Керування інтерференцією. Особлива увага приділяється запобіганню інтерференції між сусідніми мережами. Сучасні стандарти Wi-Fi (наприклад, 802.11ac і 802.11ax) включають покращені методи управління інтерференцією та передачею даних, такі як MU-MIMO (Multi-User Multiple Input Multiple Output) та OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Таким чином, частотний обмін у Wi-Fi відбувається через ретельно організований процес вибору частотного діапазону, управління каналами та методу доступу до середовища, що дозволяє ефективно та безпечно передавати дані між точкою доступу та клієнтом.

У межах однієї зони покриття безпроводні мережі налаштовуються на канали, що не перетинаються. Тоді буде менший рівень інтерференції та колізій (конфліктів). Наприклад, для протоколу 802.11n і ширини каналу 20 МГц номери каналів, що не перетинаються, – 1, 6 і 11 [2, 3].

2. Зниження потужності сигналу Wi-Fi до рівня 50-75% для забезпечення нормальної роботи точки доступу.

Велика потужність сигналу Wi-Fi не завжди сприяє стабільності і швидкості. Якщо потужність сигналу висока і радіоефір виявляється сильно завантаженим, то можуть проявитися взаємні впливи між сигналами у вигляді внутрішньоканальних та міжканальних завад. Такі завади різко збільшують рівень шуму та впливають на продуктивність мережі. Це призводить до постійного перенаправлення пакетів і низької стабільності зв'язку. Розв'язання проблеми лежить у площині зменшення потужності передавача. Можна використати інші способи, які приводять до пониження рівня сигналу: збільшити відстань між точкою доступу і адаптером, використати антену з нижчим коефіцієнтом підсилення сигналу, послабити контакт антени на точці доступу.

Потужність передавача на клієнтських мобільних пристроях зазвичай нижча у 2-3 рази, ніж у роутері. Різні значення потужності передавачів та чутливості приймачів у каналі зв'язку приводять до виникнення асиметрії.

Потрібно симетрувати з'єднання, що забезпечить хороший рівень сигналу і точка доступу та клієнт будуть впевнено чути один одного [3, 4]. Для цього іноді доводиться знижувати потужність передавача в точці доступу.

3. Частотний діапазон 2.4 ГГц – це також робочий діапазон Bluetooth-пристроїв, бездротових клавіатур та миші. Може спостерігатися їх вплив на роботу точки доступу.

Пристрої Bluetooth використовують модуляцію FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – псевдовипадкова перебудова робочої частоти), тому спектр таких сигналів розподілений у всьому частотному діапазоні 2,4 ГГц. Стандарти Wi-Fi (бездротові локальні мережі стандарту 802.11) використовують у цьому частотному діапазоні 2,4 ГГц канали з фіксованою смугою частот. Отже, якщо пристрої Bluetooth працюють в безпосередній близькості від мережі Wi-Fi, то точкам доступу стандарту 802.11 важко уникнути радіочастотних завад.

Практичні рекомендації щодо зведення до мінімуму або усунення радіочастотних завад від пристроїв Bluetooth на бездротову локальну мережу стандарту 802.11 [4].

- Замінити бездротову локальну мережу частотного діапазону 2,4 ГГц на діапазон 5 ГГц (якщо це можливо).

- По можливості перейти на використання пристроїв зі специфікацією Bluetooth версії 1.2 або пізнішої, у яких використовується адаптивна перебудова частоти (технологія AFH - Adaptive Frequency Hopping). Ця технологія (у разі виявлення завад) обмежує використання Bluetooth псевдовипадкових частот і допомагає запобігти негативному впливу пристроїв Bluetooth на інші передавальні пристрої, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц.

- Обмеження рівня сигналу у пристроях Bluetooth. Для цього доцільно використовувати пристрої Bluetooth, що базуються на специфікації версії 4.0 або пізнішої, у якій використовується низька енергія (технологія LE - Low Energy). Таке рішення гарантовано обмежує величину завад.

4. Великі відстані між Wi-Fi-пристроями.

В основі рекомендацій лежить те, що бездротові пристрої Wi-Fi мають обмежений радіус дії. Для приміщення, наприклад, залежно від наявності капітальних стін та їх кількості, конфігурації та розмірів кімнат, дальність дії точки доступу може бути обмежена кількома десятками метрів.

5. Перешкоди.

Мова йде про стелі, меблі, стіни, металеві двері тощо. Спостерігається часткова або повна втрата сигналу, якщо зазначені перешкоди розташовані між Wi-Fi-пристроями. Перешкоди відбивають або поглинають радіосигнали. Основна перешкода у містах є будівлі. Наявність капітальних стін, штукатурки на стінах, сталевих каркасів тощо впливає на якість роботи Wi-Fi-пристроїв. Людське тіло приблизно на 3 дБ зменшує рівень сигналу.

У таблиці 1.1 для частоти 2.4 ГГц наведені дані щодо втрат ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища. Ефективна відстань характеризує значення радіусу дії сигналу Wi-Fi у відсотках у порівнянні з відкритим простором (100 %).

Таблиця 1.1 – Втрати ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища

Перешкода	Додаткові втрати, дБ	Ефективна відстань, %
Відкритий простір	0	100
Вікно без тонування (відсутнє металізоване покриття)	3	70
Вікно з тонуванням (металізоване покриття)	5-8	50
Дерев'яна стіна	10	30
Міжкімнатна стіна (15,2 см)	15-20	15
Несуча стіна (30,5 см)	20-25	10
Бетонна підлога/стеля	15-25	10-15
Монолітне залізобетонне перекриття	20-25	10

Природні явища - дощ, гроза, снігопад також можуть бути причиною зменшення продуктивності безпроводної мережі. Впливати на якість сигналу, що передається, може ландшафт місцевості.

6. Вплив побутової техніки може стосуватися і промислових середовищ, якщо вона працює на робочих частотах Wi-Fi [5]:

- Монітори з ЕПТ, бездротові телефони, бездротові динаміки, електродвигуни.
- Мікрохвильові НВЧ-печі, які зазвичай також працюють у діапазоні 2,4 ГГц.
- Силові підстанції та лінії електропередачі можуть бути джерелами завад.

7. Пристрої, що працюють за стандартом USB 3.0.

Завади у цьому випадку виникають від пристроїв, які підключаються через інтерфейс USB 3.0. Для уникнення цього потрібне якісне екранування кабелю або конектора пристрою, що підключається. В противному разі можуть мати місце завади (інтерференція) на частотах в діапазоні 2,4 ГГц.

1.3 Обмеження швидкості передачі інформації у мережах Wi-Fi

Для Wi-Fi мереж у промислових середовищах, як і для будь-яких систем широкосмугового доступу, швидкість передачі інформації є критично важливим параметром. Продовжуючи наш попередній аналіз, тепер зосередимося на факторах, які впливають на цю швидкість, зокрема, на таких, що обмежують тим чи іншим чином її значення.

Основними факторами, що визначають швидкість доступу в безпроводних мережах, є:

- Поширення сигналу в середовищі загального користування;
- Багатопроменева інтерференція;
- Доплерівський ефект;
- Частотно-залежне згасання.

Поширення сигналу в атмосфері супроводжується суттєвими спотвореннями. Крім зазначених факторів, слід враховувати згасання сигналу, яке пропорційне квадрату відстані, а також поглинання енергії сигналу

компонентами атмосфери (гази, вологість, запиленість). Ці фактори негативно впливають на якість радіосигналів будь-якої частоти та потужності.

1.3.1 Вплив багатопроменевої інтерференції

Розглянемо детальніше багатопроменеву інтерференцію.

Багатопроменеве поширення виникає, коли сигнал від антени передавача до антени приймача проходить кількома маршрутами через багаторазові відбиття від перешкод. Ці траєкторії сигналів формуються природно і мають різну довжину, що впливає на час їх проходження (цей параметр називається затримкою сигналу). В антені приймача відбувається накладення сигналів, внаслідок чого кожна копія сигналу зазнає значних спотворень. Кожне відбиття від перешкод знижує потужність сигналу на 10-12 дБ, але навіть після трьох відбиттів сигнал все ще може бути достатньо сильним для розпізнавання.

Багатопроменева інтерференція особливо негативно впливає на широкосмугові сигнали. Це пов'язано з тим, що при широкій смузі частоти сигналу можуть підсумовуватися (синфазно) або, навпаки, послаблюватися (внаслідок фазового зміщення) в результаті інтерференції.

Багатопроменева інтерференція може проявлятися в двох формах негативного впливу на сигнал [4, 5]:

1. Внутрішньосимвольна інтерференція, коли затримка між копіями сигналу не перевищує тривалості символу, що призводить до спотворення в межах одного символу;
2. Міжсимвольна інтерференція (ISI, inter symbol interference), коли затримка між копіями сигналу більша за тривалість символу, що призводить до спотворення сусідніх символів.

Міжсимвольна інтерференція є більш руйнівною для передачі сигналу, оскільки змінюються всі його параметри — амплітуда та фаза, що ускладнює відновлення сигналу. Вплив міжсимвольної інтерференції продемонстровано на рисунку 1.2, де показано приклад з одиничними одиницями або нулями після серії нулів чи одиниць.

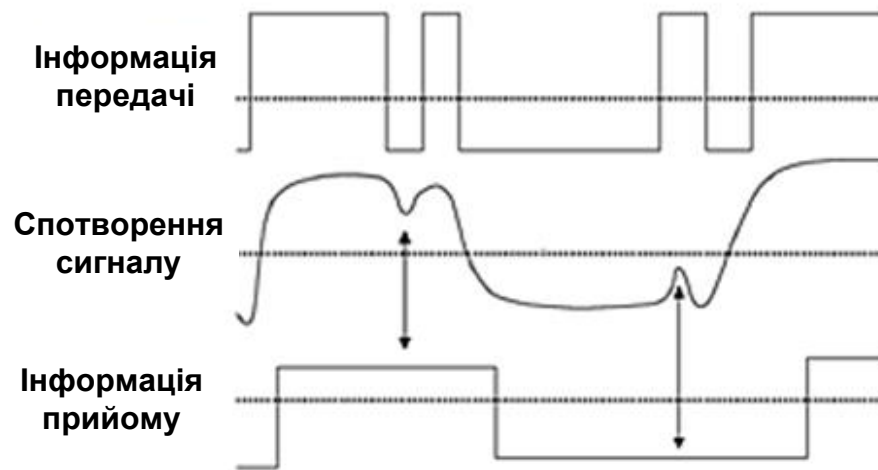


Рисунок 1.2 – Спотворення сигналу під впливом міжсимвольної інтерференції

Найбільш поширеними способами боротьби з міжсимвольною інтерференцією є адаптивна компенсація або корекція спотворень та використання кодів корекції помилки для подальшого відновлення спотворених символів на приймальній стороні, а також технологія ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням.

1.3.2 Вплив частотно-залежного згасання

При передачі широкосмугового сигналу від передавача до приймача може виникати ще один тип спотворення — частотно-залежне згасання. Це відбувається через відбиття сигналу від перешкод, які мають частково поглинаючі властивості, а також через резонансні властивості газів в атмосфері. Внаслідок цього окремі частоти широкосмугового сигналу можуть значно затухати, що ускладнює розпізнавання переданої інформації. Даний ефект ілюстровано на рисунку 1.3 [3, 5].

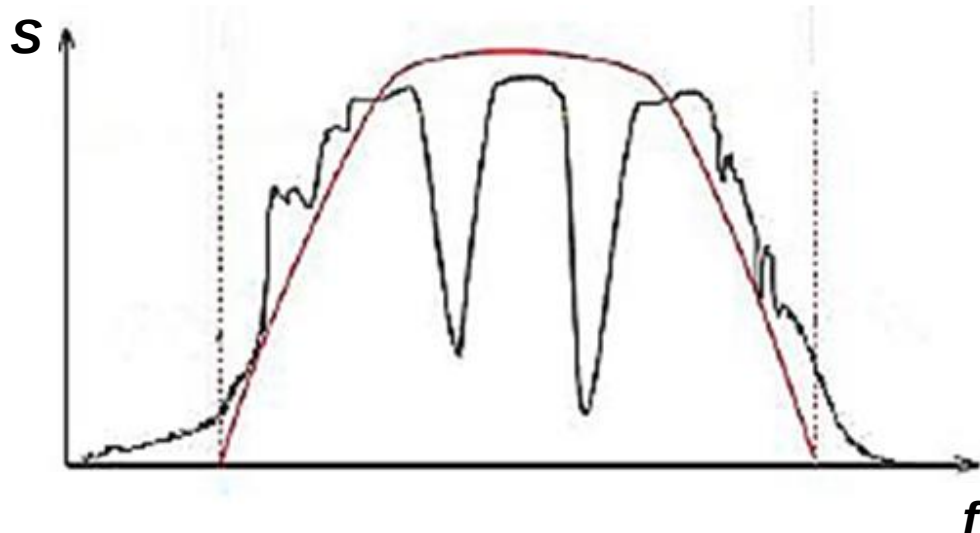


Рисунок 1.3 – Спотворення спектру сигналу при відбитті від перешкод

Поверхні перешкод відбивають і поглинають електромагнітні хвилі різних частот у різному ступені. У щільно забудованих міських районах, де сигнал піддається численним відбиткам, траєкторії його поширення є непередбачуваними, а стан атмосфери (склад, щільність газів, запиленість, вологість) постійно змінюється. Тому частотно-залежні спотворення широкосмугового сигналу важко прогнозувати.

Ефективним методом боротьби з частотно-селективним згасанням широкосмугового сигналу є модуляція, відома як ортогональне частотне розділення каналів з мультиплексуванням (OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing).

1.3.3 Доплерівський ефект – вплив руху пристроїв

Ефект Доплера виникає через рух приймача або передавача і проявляється в зміні частоти коливань сигналу, що приймається, порівняно з частотою генератора. Частота сигналу зростає при наближенні приймача до передавача і зменшується при віддаленні. Зсув частоти $\pm F_D$ сигналу, що приймається, визначається швидкістю руху v , частотою сигналу F_o та кутом α між напрямком на передавача і напрямком руху:

$$F_d = v \cdot F_0 \cdot \cos \alpha. \quad (1.1)$$

Рух абонента, як по напрямку, так і по швидкості, є непередбачуваним. Крім того, нерівності рельєфу місцевості спричиняють випадкові зміни частоти, амплітуди та фази прийнятого сигналу. Непередбачувані зміни частоти сигналу, які виникають в результаті цього, називають доплерівським розсіянням. Це розсіяння викликає нестабільне "розмазування" спектру сигналу, що передається, що в свою чергу призводить до частотних спотворень при когерентному прийомі.

Випадкові зміни амплітуди та фази, що викликані рельєфом місцевості, призводять до селективних завмирань сигналу. Для характеристики цих змін використовують параметр часу когерентності $C_0 = 1/F_0$, який визначає інтервал часу, протягом якого коефіцієнт кореляції обвідної не перевищує 0,9.

Таким чином, основні фактори, що впливають на спотворення широкопasmового радіосигналу під час його поширення в атмосфері, включають [6]:

- Вплив завад;
- Ослаблення сигналу зі збільшенням відстані;
- Згасання в атмосфері;
- Міжсимвольна інтерференція;
- Частотно-залежне згасання;
- Доплерівський ефект.

1.4 Методи збільшення швидкості передачі інформації

Пропускна здатність аналогового радіоканалу зв'язку, спотвореного гауссівським шумом (як, втім, і провідникового), тобто теоретична верхня межа швидкості передачі даних, визначається теоремою Шеннона-Хартлі [5, 7]:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1.2)$$

де C - пропускна здатність каналу, біт/с; B - ширина смуги каналу, Гц; S - повна потужність сигналу у смузі пропускання, Вт; N - повна шумова потужність (адитивний білий гаусівський шум) у смузі пропускання, Вт; S/N - відношення сигнал/шум, дБ.

У формулі (1.2) параметри S та B встановлюються передавачем, тоді як параметр N є характеристикою середовища поширення. Отже, швидкість передачі інформації в радіоканалі визначається рівнем повної шумової потужності у смузі пропускання, або простіше, рівнем шуму.

Проте рівень шуму змінюється з часом. Системи широкосмугового бездротового доступу зазвичай використовують часовий поділ сигналів (розбиття потоку на тайм-слоти), де тривалість кожного слоту є достатньо короткою (менше 1 мс), щоб враховувати зміни рівня шуму. Ця особливість дозволяє мережам бездротового доступу збільшувати швидкість передачі інформації в моменти, коли рівень шуму є низьким.

Теорема Шеннона-Хартлі застосовується до передачі бітової інформації. Для складніших сигналів, які несуть кілька біт інформації за один символ, швидкість передачі може бути вищою. Сучасні бездротові мережі використовують комбінацію двох основних методів підготовки сигналів для збільшення пропускної спроможності каналу зв'язку:

- Метод кодового розділення (CDMA), який заміщує біти інформації ортогональними чіповими послідовностями;
- Квадратурна амплітудна модуляція (КАМ), яка заміщує біти корисної інформації символами, що несуть кілька біт інформації.

Вибір між цими методами здійснюється передавальним обладнанням на основі аналізу якості каналу (сигнал/шум). Передавальне обладнання постійно моніторить частотно-часовий канал для оцінки його якості. У тайм-слотах з хорошою якістю каналу передавальне обладнання може передавати інформацію з вищою швидкістю.

Урахування умов поширення радіохвиль у каналі зв'язку та адаптація до них шляхом вибору оптимальних схем модуляції та кодування дозволяє досягти максимальної пропускної спроможності мережі доступу. Наприклад, існують стандарти, де точність визначення випромінюваної потужності досягає 0,5 дБ, а кількість можливих схем модуляції та кодування налічує 29.

У стандарті Wi-Fi, який найбільше підходить для роботи в промислових середовищах, застосовується технологія OFDM (ортогональне частотне розділення каналів) з квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ) на множині піднесущих. Розглянемо основні аспекти цієї модуляції.

Квадратурна амплітудна модуляція (КАМ) характеризується тим, що кожний каналний символ має своє значення амплітуди та початкової фази. Кількість можливих значень цих параметрів дискретна. Один i -символ сигналу при такому способі модуляції має вигляд [6, 7]:

$$s_{QAM}(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \varphi_i) = \operatorname{Re}[A_i \exp(j\varphi_i) \exp(\omega_0 t)], \quad (1.3)$$

$$(i-1)T_b < t \leq iT_b.$$

де $A_i \exp(j\varphi_i)$ - комплексна амплітуда каналного символу; $i = 1, 2, \dots, M$.

Фазоманіпульований сигнал (символ з амплітудою A) можна записати у вигляді [7]:

$$s_{QAM}(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) = A \cos \varphi \cdot \cos \omega_0 t - A \sin \varphi \cdot \sin \omega_0 t =$$

$$= I(t) \cdot \cos \omega_0 t - Q(t) \cdot \sin \omega_0 t. \quad (1.4)$$

У цьому виразі $I(t)$ та $Q(t)$ – амплітуди синфазної та квадратурної компонент модульованого сигналу. Вони на інтервалі $(i-1)T_c < t \leq iT_c$, визначаються видом кодової комбінації. Вони незмінні на цьому інтервалі, що визначається формою блоку бітів. Значення амплітуд синфазної та квадратурної компонент $I(t)$ та $Q(t)$ залежать як від позиційності квадратурної амплітудної модуляції, так і від зазначеного виду кодової комбінації. Амплітуда

модульованого сигналу (символу) та його початкова фаза визначаються за формулами [4-5].

Амплітуда:

$$A_m = \sqrt{Q_m^2 + I_m^2} \quad (1.5)$$

Фаза модульованого сигналу

$$\varphi_m = \arctg \frac{Q_m}{I_m} \quad (1.6)$$

Отже, символ характеризується амплітудою і фазою несущого коливання, які визначаються відповідно співвідношеннями (1.5) та (1.6).

Для синфазної та квадратурної складових несучого коливання використовується однаковий дискрет амплітуди. Тому на фазовій площині, що визначається дійсною $\text{Re}(z)$ і уявною $\text{Im}(z)$ складовими вектора модульованого сигналу, кінці векторів утворюють прямокутну сітку. Значення позиційності алгоритму QAM визначає кількість вузлів цієї сітки. Сигнальне сузір'я для QAM-16 зображено на рисунку 1.4.

В алгоритмі QAM-N число N дорівнює 2^n , що представляє максимальну кількість різновидів модульованого сигналу. Показник n визначає теоретичну спектральну ефективність даного алгоритму. Рівень або позиційність модуляції визначає кількість бітів, які передаються одним символом несучої. Наприклад, один символ QAM-16 передає 4 біти інформації, QAM-32 – 5 біт, QAM-64 – 6 біт тощо.

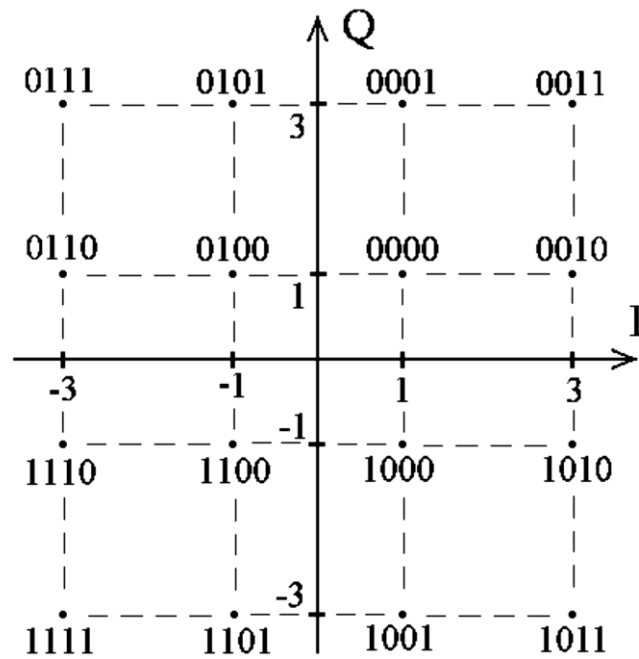


Рисунок 1.4 – Сигнальне сузір'я модуляції QAM-16

На рисунку 1.5 наведено спрощену структуру модулятора QAM-16.

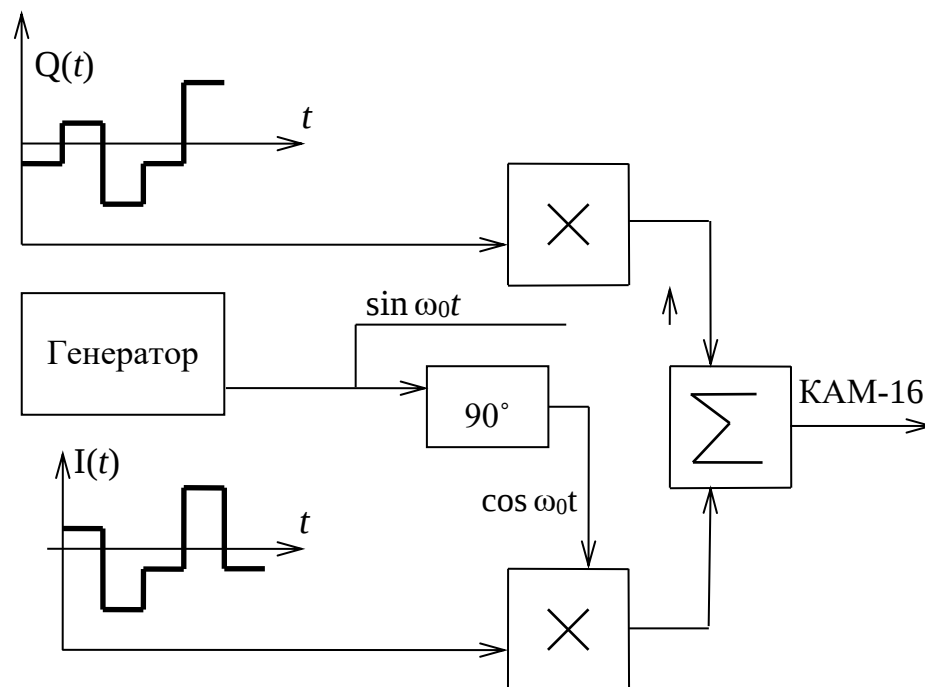


Рисунок 1.5 – Спрощена структурна схема модулятора QAM-16

На цьому рисунку показано зміни амплітуд синфазної та квадратурної компонент залежно від типу кодових комбінацій. Ці комбінації представляють чотирипозиційні дискретні сигнали, які впливають на входи помножувачів. Для

QAM-16 значення амплітуд I_k та Q_k можуть бути з множини (1, 3, -1, -3). Реалізація знаків «плюс/мінус» для амплітуд синфазної та квадратурної компонент відбувається в помножувачах, шляхом зміни фази синусоїдальної та косинусоїдальної несучих на 180° . Амплітуди компонент (1, 3, -1, -3) мають відносний характер.

Швидкість передачі даних і завадостійкість зростають і зменшуються відповідно до порядку модуляції. Схеми модуляції вищого порядку мають меншу завадостійкість [7, 8].

Сучасні системи використовують адаптацію до умов каналу, що включає вибір модуляційної схеми, яка забезпечує найвищу швидкість передачі даних за заданих умов. Для цього постійно моніториться рівень сигнал-шум у каналі передачі, що дозволяє досягти ефективної передачі даних з мінімальним відсотком помилок.

Спектральна ефективність і завадостійкість КАМ змінюються в протилежних напрямках. Аналіз сузір'я показує, що збільшення кількості точок сузір'я призводить до зменшення відстані d між ними, що підвищує ймовірність помилок при розпізнаванні вектора Z через вплив завад. Ці завади викликають непередбачувані зміни амплітуди та фази сигналу. При квадратурній амплітудній модуляції сигнальні точки рівномірно розташовані на комплексній площині, що збільшує відстань між сусідніми точками і покращує завадозахищеність системи. На відміну від цього, при фазовій модуляції сигнальні точки розташовані по колу комплексної площини, і збільшення порядку фазової модуляції зменшує відстань між сусідніми векторами, що погіршує завадостійкість. Для КАМ ця залежність є менш вираженою.

1.5 Висновки до розділу

Wi-Fi мережі в промислових умовах стикаються з рядом проблем і викликів, які можуть серйозно ускладнити їхню функціональність і надійність. Основні проблеми включають:

- Електромагнітні завади
- Висока щільність пристроїв
- Фізичні перешкоди
- Вимоги до надійності та безпеки
- Високі вимоги до продуктивності
- Складність управління та моніторингу

Ці проблеми вимагають спеціальних рішень і технологій для адаптації Wi-Fi мереж до промислових умов, таких як використання завадостійких модуляцій, розгортання Mesh-мереж, впровадження засобів управління трафіком і безпекою, а також оптимізація продуктивності мережі.

Проаналізовані основні чинники, які впливають на ефективність бездротових мереж Wi-Fi в промислових умовах, і надані рекомендації для забезпечення їх нормальної роботи. Для забезпечення сумісності з іншими Wi-Fi пристроями (точки доступу, бездротові камери тощо) рекомендується звернути увагу на вибір частотного каналу роутера. Може бути доцільним зниження потужності сигналу Wi-Fi до 50-75%.

Щодо пристроїв Bluetooth, щоб зменшити або усунути радіочастотні завади від них на бездротову локальну мережу стандарту 802.11, рекомендується:

- Використовувати мережу діапазону 5 ГГц замість 2,4 ГГц для Wi-Fi, щоб уникнути радіочастотних перешкод від пристроїв Bluetooth, які працюють у переповненому діапазоні 2,4 ГГц.
- Використовувати пристрої з Bluetooth версії 1.2 або пізнішої, які підтримують технологію адаптивної перебудови частоти (AFH). Ця технологія обмежує використання псевдовипадкових частот у випадку завад, що допомагає зменшити негативний вплив на інші передавальні пристрої в діапазоні 2,4 ГГц.

Для частотного діапазону 2,4 ГГц проаналізовані втрати ефективності сигналу Wi-Fi при проходженні через різні середовища. Визначено фактори, які впливають на швидкість передачі даних Wi-Fi мережі, такі як поширення у

середовищі загального користування, інтерференція, доплерівський ефект і частотно-залежне згасання.

Для досягнення максимального рівня швидкості проводиться аналіз якості каналу (співвідношення сигнал/шум). Передавальне обладнання постійно моніторить частотно-часовий канал з метою оцінки його якості. В ті тайм-слоти, коли якість каналу хороша, передавальне обладнання може передавати дані з більш високою швидкістю.

У стандартах Wi-Fi, які найкраще адаптовані до промислових умов, використовуються технології OFDM (ортогональне частотне розділення каналів) з квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ) на множині піднесущих. Розглянуто математичні аспекти формування символів у квадратурній амплітудній модуляції за допомогою квадратурних компонент.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ Wi-Fi, АДАПТОВАНИХ ДО ПРОМИСЛОВИХ СЕРЕДОВИЩ

2.1 Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів

На рисунку 2.1 представлена структурна схема OFDM-формувача, яка ілюструє принцип формування OFDM-радіосигналу. OFDM-формувач включає демультимплексор (ДМПЛ) для цифрового потоку, N BPSK каналних модулаторів (КМ), N генераторів несучих частот (ГНЧ) f_{nq} ($q = 0, 1, 2, 3, \dots, (N-1)$), а також підсумовуючий пристрій - суматор (СУ).

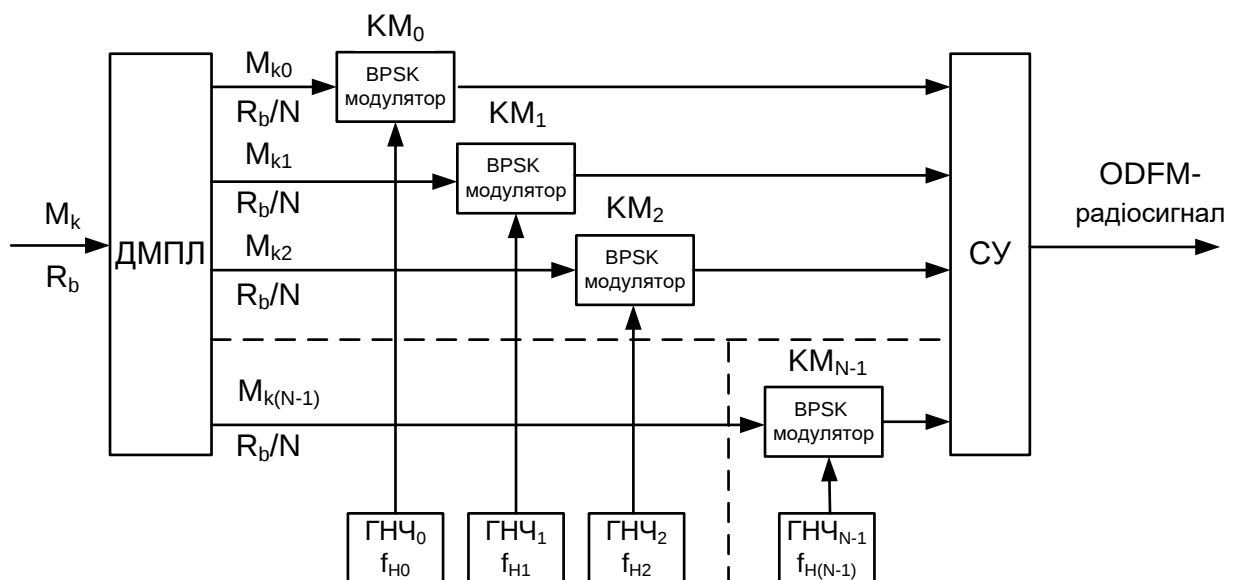


Рисунок 2.1 - Структурна схема OFDM-формувача, що ілюструє принцип отримання OFDM-радіосигналу

У технології OFDM несучі частоти f_{nq} також називаються "піднесущими частотами". Вхідний цифровий потік M_k зі швидкістю R_b розподіляється в ДМПЛ на низькошвидкісні каналні цифрові потоки M_{kq} зі швидкостями R_b/N . Кожен з цих низькошвидкісних каналів здійснює BPSK-модуляцію своєї несучої частоти f_{nq} у відповідному каналному модуляторі $КМ_q$. Важливо зазначити, що на

практиці можуть використовуватися й інші види модуляції, такі як QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM тощо.

У суматорі (СУ) здійснюється додавання каналних радіосигналів з різними несучими частотами ($f_{n0}, f_{n1}, \dots, f_{n(N-1)}$), що призводить до утворення високочастотного OFDM-сигналу.

Технологія формування високочастотних OFDM-символів (OFDM-радіосимволів) з використанням каналних BPSK-модуляторів пояснюється рисунком 2.2. У межах проміжку часу T , протягом якого формується N бітів вхідного цифрового потоку M_k (рис. 2.2, а), формується один OFDM-радіосимвол з розподілом N бітів потоку M_k на N несущих частот (рис. 2.2, б).

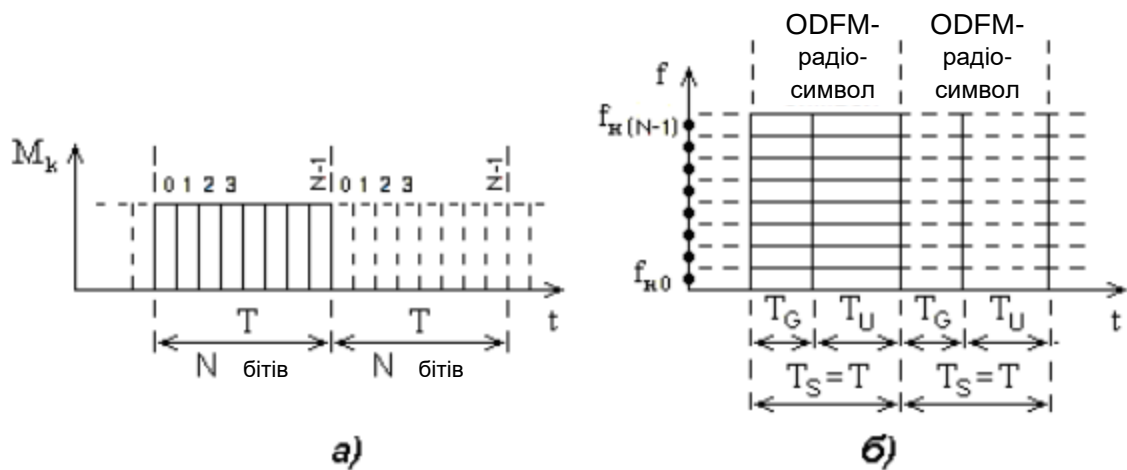


Рисунок 2.2 - До пояснення принципу формування OFDM-радіосимволів при використанні в низькошвидкісних каналах BPSK-модуляторів

Таким чином, дані розподіляються по кільком частотним підканалам, що дозволяє здійснювати паралельну передачу на всіх цих каналах. Висока загальна швидкість передачі досягається завдяки одночасній передачі даних, хоча швидкість в окремому підканалі може бути невисокою. Якщо позначити швидкість передачі в i -му частотному каналі як R_i , то загальна швидкість передачі через N каналів визначається формулою:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N R_i. \quad (2.1)$$

Оскільки в кожному з підканалів швидкість передачі даних може бути помірною, це створює умови для ефективного придушення міжсимвольної інтерференції.

OFDM-радіосимвол складається з двох часових компонент (T_G та T_U) і передається протягом часу T (див. рис. 2.2, б):

$$T_S = T_G + T_U = T. \quad (2.2)$$

Часова компонента T_G є захисним інтервалом OFDM-радіосимволу та не використовується при прийомі. Частина T_U є корисною (робочою) частиною OFDM-радіосимволу і обробляється в приймачі. Завдяки розділенню корисних частин сусідніх OFDM-радіосимволів захисним інтервалом, технологія OFDM має ряд переваг.

Якщо замість канальних BPSK-модуляторів (див. рис. 2.1) використовувати QPSK, 16-QAM, 64-QAM або 256-QAM, то на N несущих частотах можна розподілити відповідно $2N$, $4N$, $6N$ або $8N$ бітів, що дозволяє збільшити швидкість передачі цифрового потоку в 2, 4, 6 або 8 разів при тій же ширині смуги частот радіоканалу.

Кількість несущих в різних системах зв'язку, що використовують технологію OFDM, варіюється в залежності від режиму роботи. Наприклад, у системі мобільного зв'язку 4-го покоління LTE (Long-Term Evolution) число несущих може становити 128, 256, 512, 1024 або 2048. Однак структурна схема на рис. 2.1, яка містить N генераторів несущих частот (ГНЧ) та N канальних модуляторів (КМ), ілюструє лише принцип отримання OFDM-радіосигналу і на практиці не застосовується.

У OFDM-формувачах генерація великої кількості несущих OFDM-радіосигналу здійснюється за допомогою зворотного дискретного перетворення Фур'є (ЗДПФ, IDFT – Inverse Discrete Fourier Transform), яке застосовується до символів цифрового потоку протягом часу T . Спочатку формуються низькочастотні (НЧ) OFDM-символи на основі гармонік з частотами $F_{n0}, F_{n1}, \dots$,

$F_{n(N-1)}$ (відповідно до НЧ піднесуших). Після цього НЧ OFDM-символи переносяться в радіодіапазон, утворюючи високочастотні (ВЧ) OFDM-радіосимволи, що складаються із суми ортогональних коливань на несучих частотах $f_{n0}, f_{n1}, \dots, f_{n(N-1)}$. Таким чином, потреба у великій кількості ГНЧ і КМ в OFDM-формуваві відпадає.

Щоб уникнути взаємного впливу каналів з різними несущими частотами, різниця частот ($\Delta f_n = f_{nq} - f_{n(q-1)}$) обирається так, щоб коливання на несучих частотах були ортогональними. Умова ортогональності для частот $f_{n0}, f_{n1}, \dots, f_{n(N-1)}$ виконується, якщо на інтервалі T_U укладатиметься ціле число періодів різницевих частот:

$$\Delta f_n = f_{nq} - f_{n(q-1)} = 1/T_U. \quad (2.3)$$

Рисунок 2.3 демонструє спектри радіосигналів для технології OFDM.

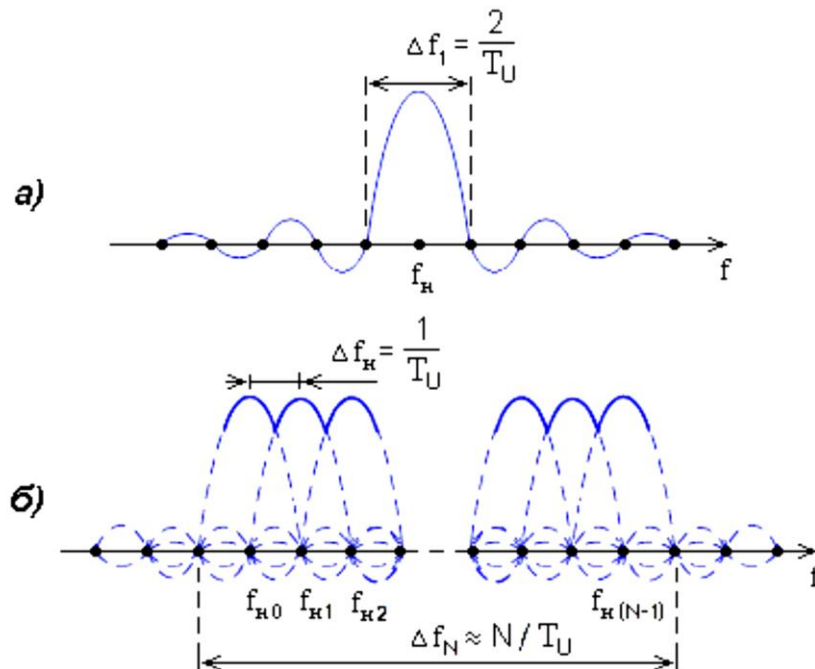


Рисунок 2.3 - Спектр вузькосмугового каналного радіосигналу на одній несущій (а); спектр OFDM-радіосигналу на ортогональних несущих частотах з сусідніми бічними смугами, що перекриваються (б)

На рисунку 2.3, а показано спектр одного вузькосмугового каналного радіосигналу з однією несучою (з шириною смуги частот по першій пелюстці ($\Delta f_1 = 2/T_U$)), а на рисунку 2.3, б – спектр OFDM-радіосигналу, де на частоті кожної несучої спектральні компоненти інших несущих проходять через нуль. Це виключає взаємний вплив каналів різних несущих один на одного, хоча їхні сусідні бічні смуги можуть перекриватися.

Умова ортогональності коливань може бути сформульована через скалярний добуток: коливання вважаються ортогональними, якщо їх скалярний добуток дорівнює нулю. Скалярний добуток визначається інтегралом від добутку коливань на інтервалі тривалості символу:

$$\int_0^T \sin 2\pi f_l t \cdot \sin 2\pi f_k t = 0, k \neq l, \quad (2.4)$$

де T - тривалість символу, f_k, f_l - несущі частоти каналів k і l .

Використання технології OFDM забезпечує високу стійкість систем мобільного зв'язку до перешкод завдяки багатопроменевому поширенню радіохвиль, що особливо важливо в міських районах з багатоповерховою забудовою. Як зазначалося в попередньому розділі, багатопроменева природа радіохвиль призводить до виникнення «ехо-радіохвиль», тобто радіохвиль, що відбиваються від різних перешкод і досягають точки прийому з різним затримками. Ці ехо-радіохвилі викликають три негативні ефекти.

Перший з них полягає в значних завмираннях радіосигналу в точці прийому, які виникають внаслідок інтерференції основної радіохвилі та ехо-радіохвиль. Значні завмирання можуть ускладнити або навіть унеможливити прийом переданої інформації. Особливо яскраво цей ефект проявляється під час руху приймача відносно передавача, коли зміна рівня радіосигналу в точці прийому може досягати глибоких завмирань до 40 дБ. Однак глибокі завмирання спостерігаються не для всіх, а лише для деяких (селективних) частот. Тому при використанні технології OFDM під час прийому може відбутися лише часткова

втрата бітів початкового цифрового потоку M_k , переданих на цих несучих частотах. Відновлення частково втрачених бітів (інформації) можливо завдяки використанню надлишкових бітів завадостійкого кодування в початковому цифровому потоці M_k .

Другий негативний ефект, пов'язаний з ехо-радіохвилями, полягає в міжсимвольній інтерференції цифрового сигналу. Коли корисний сигнал з антени потрапляє на вхід приймача разом, наприклад, з одним ехо-сигналом, затриманим у часі, і якщо ця затримка становить половину або більше тривалості наступного символу, то спостерігається різке збільшення кількості цифрових помилок.

У технології OFDM тривалість передачі корисної частини OFDM-символу перевищує тривалість біта початкового потоку. Це забезпечує надійний захист від міжсимвольної інтерференції, оскільки лише мала частка корисної частини OFDM-символу може бути уражена. Додатково, наявність захисного інтервалу в OFDM-символі (див. рис. 2.4) практично усуває можливість виникнення міжсимвольної інтерференції.

Завдяки захисному інтервалу створюються часові паузи між окремими символами. Якщо тривалість захисного інтервалу перевищує максимальний час затримки сигналу через багатопроменеве поширення, міжсимвольна інтерференція не виникає.

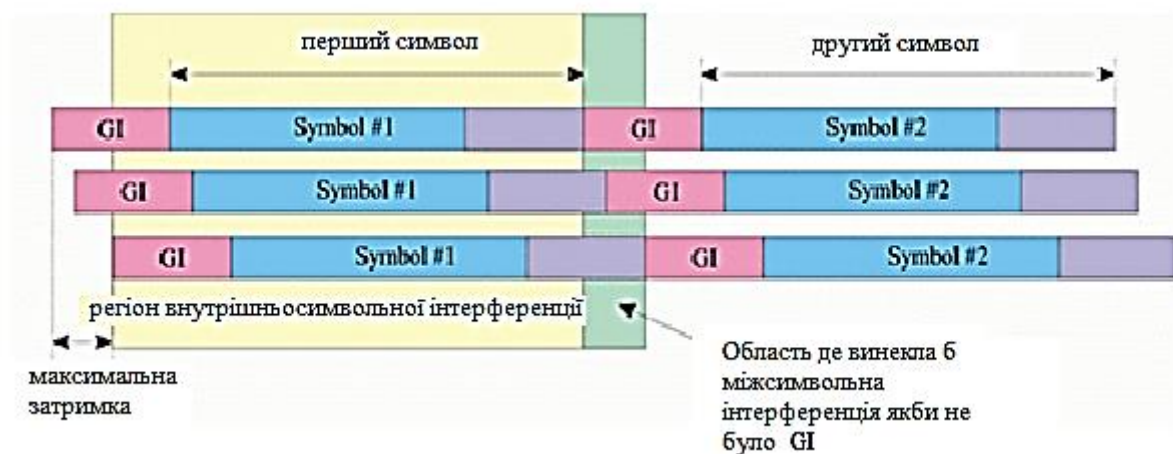


Рисунок 2.4 – Додавання захисного інтервалу

Для формування захисного інтервалу тривалістю T_G в НЧ OFDM-символі використовується процедура, відома як "вставка циклічного префікса" (ВЦП), як показано на рисунку 2.5. Ця процедура полягає в тому, що копія кінцевої частини корисного OFDM-символу вставляється перед його основною частиною (GI). Тривалість циклічного префікса, а отже, і захисного інтервалу, може варіюватися.

Цей префікс називається циклічним, оскільки його додавання здійснюється для всіх OFDM-символів, які формуються в передавачі.

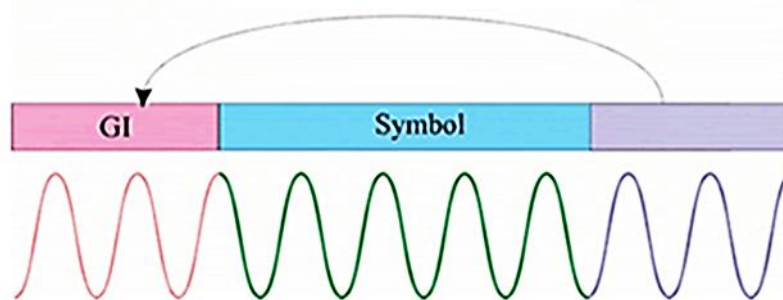


Рисунок 2.5 – Циклічне копіювання

З рисунку видно, що префікс забезпечує безперервність сигналу на межі між захисним інтервалом та корисною частиною OFDM-символу, що сприяє стабільній роботі приймальної апаратури.

Отже, у технології OFDM часовий інтервал символу субпотoku T_S ділиться на дві частини: захисний інтервал T_G , під час якого оцінка значення символу в декодері не проводиться, і робочий інтервал T_U , протягом якого приймається рішення про значення символу. Для ефективної роботи системи ехопридушення важливо, щоб захисні інтервали розташовувалися на початку символів субпотоків, що дозволяє продовжувати модуляцію несучої попереднім символом.

Третій негативний ефект, пов'язаний з ехо-радіохвилями, полягає у стрибках фази та амплітуди високочастотного радіосигналу, що можуть викликати збої в роботі приймального обладнання. Відомо, що сума кількох коливань з однією частотою, але різними амплітудами та фазами, є коливанням

тієї ж частоти з новою амплітудою та фазою. В залежності від фази, результуюча амплітуда може зменшуватися або збільшуватися. Очевидно, що стрибки фази та амплітуди на вході приймача будуть посилюватися, коли на антену приймача надходять багато ехо-радіохвиль з різними затримками.

Завдяки технології OFDM, захисний інтервал, тривалість якого перевищує час затримки ехо-радіохвиль, дозволяє усунути негативний вплив стрибків фази та амплітуди прийнятого радіосигналу.

На рисунку 2.6 представлена структурна схема формувача OFDM-радіосигналу з блоком ЗДПФ. Схема включає мультиплексор (МПЛ), амплітудно-фазовий кодер (АФК), перетворювач послідовного цифрового потоку в паралельний (S/P – Sequential/Parallel), блок швидкого зворотного дискретного перетворення Фур'є (ОДПФ), блок вставки циклічного префікса (ВЦП), два цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) на основі фільтрів нижніх частот (ФНЧ) та квадратурний модулятор (КВМ).

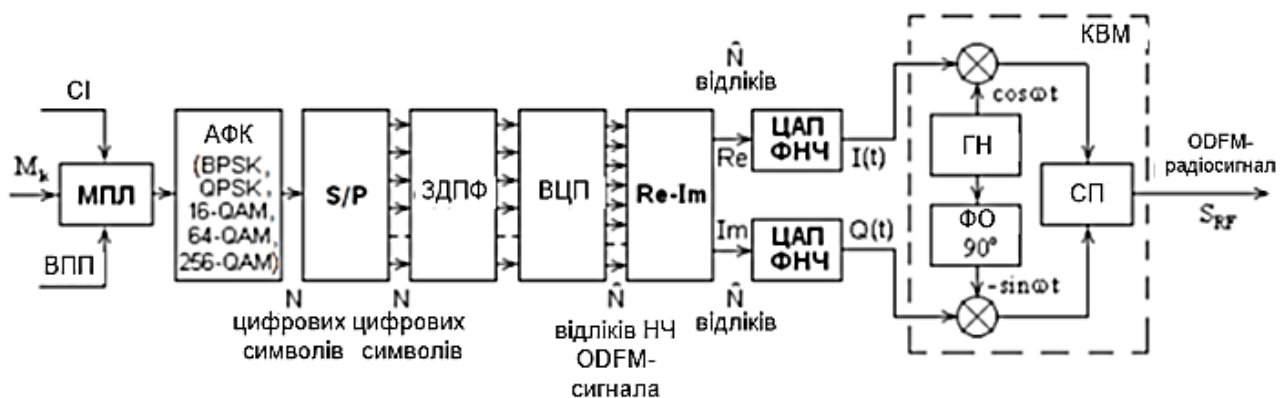


Рисунок 2.6 - Структурна схема формувача OFDM-радіосигналу з блоком ЗДПФ

За допомогою мультиплексора (МПЛ) до цифрового потоку додаються символи службової інформації (СІ) та символи вставки пілотних піднесущих (ВПП). Блок амплітудно-фазового кодування (АФК) може формувати символні послідовності з різною кількістю рівнів: $M = 2^1 = 2$; $M = 2^2 = 4$; $M = 2^4 = 16$; $M = 2^6 = 64$;

$M=2^8=256$. Таким чином, амплітудно-фазове кодування цифрової послідовності в блокові АФК відповідає BPSK ($M = 2$), QPSK ($M = 4$), 16-QAM ($M = 16$), 64-QAM ($M = 64$) і 256-QAM ($M = 256$).

У блоці S/P за кожен інтервал часу T запам'ятовується N символів цифрової послідовності для подальшої процедури ЗДПФ. Блок ЗДПФ виконує швидке зворотне дискретне перетворення Фур'є для N -символьної цифрової послідовності в кожному інтервалі часу T , створюючи N комплексних дискретних відліків низькочастотного (НЧ) OFDM-символу.

Для вставки циклічного префіксу в НЧ OFDM-символ у блоці ВЦП протягом інтервалу часу T записуються N комплексних дискретних відліків, а в наступному інтервалі часу T ці відліки зчитуються в специфічному порядку, що дозволяє утворити більше відліків.

Блок Re-Im виділяє дійсні (Re) та уявні (Im) складові дискретних відліків, отриманих після ВЦП. Блоки ЦАП перетворюють за кожен інтервал часу T $\tilde{N}$ Re-складових і $\tilde{N}$ Im-складових у безперервні аналогові сигнали $I(t)$ і $Q(t)$.

Протягом інтервалу часу T сигнал $I(t)$ є низькочастотним I-OFDM-символом, а сигнал $Q(t)$ – низькочастотним Q-OFDM-символом. I-OFDM та Q-OFDM символи формуються відповідно з косинусоїдальних і синусоїдальних ортогональних гармонік з частотами $F_{n0}, F_{n1}, \dots, F_{n(N-1)}$. У квадратурному модуляторі (КМ) відбувається перенесення спектрів низькочастотних I-Q-OFDM символів в область високих частот, створюючи односмуговий OFDM-радіосигнал з ортогональними несучими частотами $f_{n0}, f_{n1}, \dots, f_{n(N-1)}$.

Багато стандартів 802.11, які застосовуються в промислових умовах, використовують технологію OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). OFDMA є версією OFDM, оптимізованою для багатокористувацького доступу. Наприклад, у Wi-Fi 6 (802.11ax) OFDMA є однією з ключових функцій для підвищення продуктивності мережі.

Обидві технології – OFDM та OFDMA – ділять передані дані на кілька невеликих пакетів, що дозволяє ефективно передавати інформацію. Додатково, OFDMA розподіляє канал на менші частотні компоненти, які називаються

піднесущими. Це дозволяє одночасно передавати невеликі пакети даних на кілька пристроїв без необхідності їх затримки. У низхідній лінії OFDMA маршрутизатор може використовувати різні групи для відправки пакетів різним клієнтам, що допомагає управляти затримкою. Цей гнучкий і децентралізований підхід значно підвищує швидкість і ефективність мережі.

2.2 Огляд технології MIMO

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) передбачає використання кількох передавальних і приймальних антен. У системах з однією передавальною та однією приймальною антеною говорять про SISO (Single Input Single Output). Принцип реалізації MIMO ілюструється на рисунку 2.7.

Послідовність, що передається, ділиться на паралельні потоки, які в подальшому відновлюються на приймальному боці. Виникає певна складність, оскільки кожна антена приймає суперпозицію сигналів, які потрібно відокремити. Для цього на приймальному кінці використовується спеціально розроблений алгоритм просторового виявлення сигналу. Цей алгоритм базується на виділенні піднесущих частот, і його складність зростає зі збільшенням їх кількості.

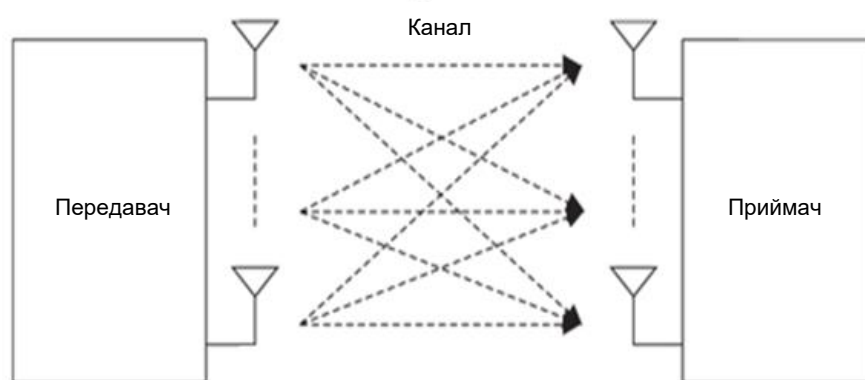


Рисунок 2.7 - Принцип реалізації технології MIMO

Для забезпечення сумісності MIMO-станцій з традиційними станціями передбачено три режими роботи [7]:

- успадкований режим (legacy mode);
- змішаний режим (mixed mode);
- режим зеленого поля (green field mode).

Кожен з цих режимів має свою специфічну структуру преамбули — службового поля пакета, яке сигналізує про початок передачі та служить для синхронізації між приймачем і передавачем. У преамбулі міститься інформація про довжину пакета, його тип, обрану модуляцію, метод кодування та всі параметри, що стосуються кодування. Щоб уникнути конфліктів між MIMO-станціями та традиційними (з однією антеною), пакет, що передається між MIMO-станціями, супроводжується особливою преамбулою та заголовком. Отримавши таку інформацію, станції в успадкованому режимі відкладають передачу до завершення сеансу між MIMO-станціями. Крім того, структура преамбули визначає ряд початкових завдань для приймача, таких як оцінка потужності сигналу для автоматичного регулювання посилення, виявлення початку пакета та корекція зміщення за часом і частотою.

2.2.1 Режими роботи станцій MIMO

Успадкований режим. Цей режим призначений для забезпечення обміну даними між двома станціями, що використовують одну антену. Інформація передається за протоколами IEEE 802.11a. Якщо передавачем є станція MIMO, а приймачем — звичайна станція, то в цій системі використовується лише одна антена, і процес передачі здійснюється так само, як і в попередніх версіях стандарту Wi-Fi. У зворотному напрямку, коли звичайна станція передає дані до MIMO, станція MIMO використовує декілька приймальних антен, проте швидкість передачі залишається не максимальна. Структура преамбули в цьому режимі відповідає версії IEEE 802.11a [6].

Змішаний режим. У цьому режимі обмін інформацією відбувається як між системами MIMO, так і між звичайними станціями. У зв'язку з цим системи MIMO генерують два типи пакетів, в залежності від типу приймача. Взаємодія зі звичайними станціями відбувається повільніше, оскільки вони не підтримують

високу швидкість, тоді як обмін між МІМО-станціями проходить значно швидше, але швидкість все ще нижча, ніж у режимі зеленого поля. Преамбула пакета від звичайної станції залишається такою ж, як і в стандарті IEEE 802.11a, тоді як у пакеті МІМО вона має деякі зміни. Якщо передавачем є система МІМО, кожна антена передає не всю преамбулу, а циклічно зміщену, що зменшує споживання енергії та підвищує ефективність використання каналу. Однак не всі звичайні станції можуть працювати в цьому режимі, оскільки втрата синхронізації може статися, якщо алгоритм синхронізації базується на взаємній кореляції.

Режим зеленого поля. Цей режим повністю використовує переваги систем МІМО. Передача можлива лише між багатоантенними станціями за наявності звичайних приймачів. Під час передачі МІМО-системою звичайні станції чекають звільнення каналу, щоб уникнути конфліктів. У режимі зеленого поля звичайні станції можуть приймати сигнали від систем, що працюють за попередніми схемами, але не можуть передавати дані, що виключає одноантенні станції з обміну, підвищуючи швидкість роботи. У всіх режимах має бути передбачений захист від впливу сусідніх станцій, щоб уникнути спотворення сигналів.

Швидкість передачі залежить від кількох чинників (табл. 2.1), зокрема від ширини смуги пропускання. Чим ширша смуга, тим вища швидкість обміну. Другим важливим фактором є кількість паралельних потоків. Також суттєве значення має тип модуляції та метод кодування. Перешкодостійкі коди, що зазвичай використовуються в мережах, включають певну надмірність. Якщо захисних бітів буде занадто багато, це призведе до зниження швидкості передачі корисної інформації. У стандарті 802.11n максимальна відносна швидкість кодування складає до 5/6, тобто на 5 біт даних припадає один надлишковий. У таблиці 2.1 наведено швидкості обміну для квадратурної модуляції QAM та BPSK, з яких видно, що за інших однакових параметрів модуляція QAM забезпечує значно вищу швидкість роботи [7].

Таблиця 2.1 – Швидкість передачі даних при різних типах модуляції

Модуляція	Відносна швидкість кодування	Смуга пропускання, МГц	Кількість піднесущих	Число каналів	Швидкість передачі даних при $CP=800\text{нс}$	Швидкість передачі даних при $CP=400\text{нс}$
BPSK	1/2	20	52	1	6,5	7,2
64-QAM	5/6				65	72,2
BPSK	1/2			2	13	14,4
64-QAM	5/6				130	144
BPSK	1/2			3	19,5	21,7
6-QAM	5/6				195	216,7
BPSK	1/2			4	26	28,9
64-QAM	5/6				260	288,9
BPSK	1/2	40	108	1	13,5	15
64-QAM	5/6				135	150
BPSK	1/2			2	27	30
64-QAM	5/6				270	300
BPSK	1/2			3	40,5	45
64-QAM	5/6				405	450
BPSK	1/2			4	54	60
64-QAM	5/6				540	600

У стандарті IEEE 802.11n дозволяється використовувати до чотирьох антен як біля точки доступу, так і в бездротовому адаптері. Обов'язковий режим передбачає підтримку двох антен у точці доступу та однієї в адаптері. Стандарт включає як канали зв'язку шириною 20 МГц, так і канали з подвоєною шириною [6]. Загальна структурна схема передавача показана на рис. 2.8.

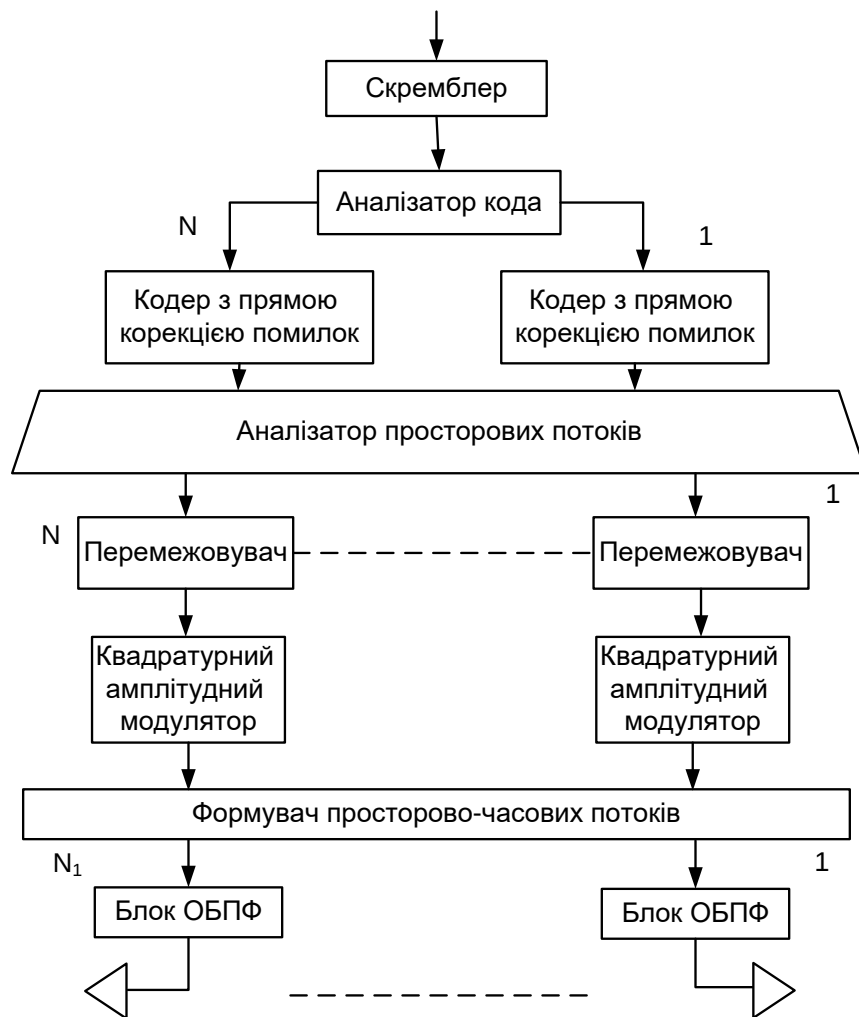


Рисунок 2.8 - Загальна структурна схема передавача MIMO-OFDM

Дані проходять через скремблер, який вставляє додаткові нулі або одиниці (так зване маскування псевдовипадковим шумом) для уникнення довгих послідовностей однакових символів. Потім дані розподіляються на N потоків і передаються на кодер з прямою корекцією помилок (FEC). Для систем з однією або двома антенами N становить 1, тоді як для трьох або чотирьох передавальних каналів N дорівнює 2.

Кодована послідовність розділяється на окремі просторові потоки. Біти в кожному потоці перемежуються для усунення блокових помилок і підлягають модуляції. Після цього формуються просторово-часові потоки, які проходять через блок зворотного швидкого перетворення Фур'є і надходять на антени. Кількість просторово-часових потоків відповідає кількості антен. Структура

приймача, яка є аналогічною структурі передавача, показана на рис. 2.9, але всі дії виконуються в зворотному порядку [7].

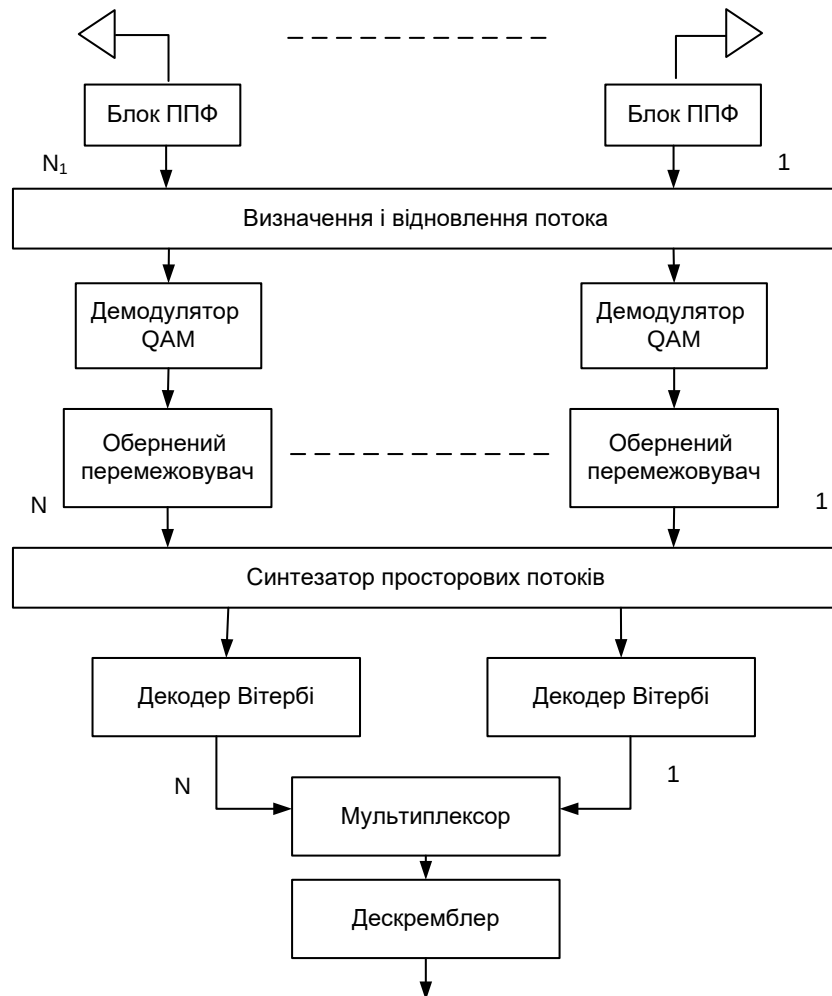


Рисунок 2.9 - Загальна структурна схема приймача MIMO-OFDM

2.2.2 Фактори збільшення швидкості передачі даних

При використанні MIMO існує три основні механізми для підвищення швидкості передачі даних:

- використання кількох приймачів і спеціальних алгоритмів передачі та прийому радіосигналу, відомих під аббревіатурою MIMO;
- розширення смуги частот сигналу з 20 до 40 МГц;
- оптимізація протоколу доступу до мережі.

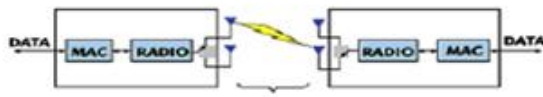
Розглянемо ці механізми більш детально.

Перший механізм, як показано на рисунку 2.10, полягає в можливості одночасної передачі кількох потоків даних в одному каналі завдяки MIMO. Це

дозволяє за допомогою складних алгоритмів обробки відновлювати їх на прийомі. Отже, MIMO забезпечує кілька шляхів передачі, що збільшує загальну пропускну спроможність системи.

Було:

1 шлях передачі даних



Стало:

кілька шляхів передачі даних

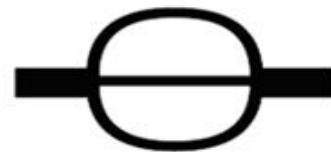
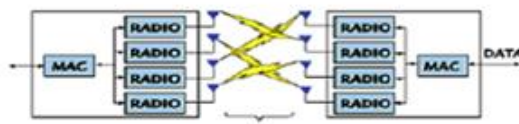
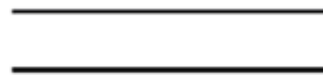
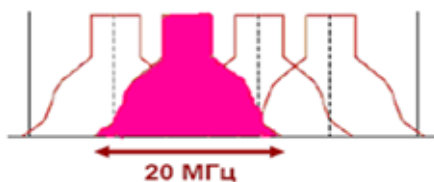


Рисунок 2.10 - Перший фактор збільшення швидкості передачі даних

Другий фактор, рисунок 2.11 – збільшення доступної ширини смуги частот. Теоретично досяжна пропускна здатність каналу зв'язку безпосередньо залежить від ширини займаної ним смуги частот. У новому стандарті сусідні канали по 20 МГц можна поєднувати і таким чином збільшувати пропускну здатність практично вдвічі.

Було:

Односмугова магістраль передачі даних



Стало:

Двосмугова магістраль передачі даних

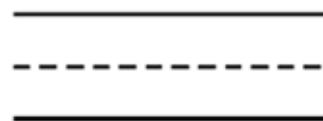
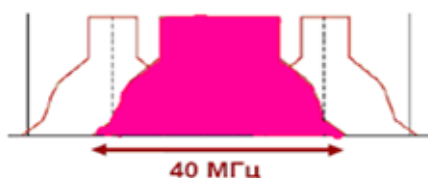


Рисунок 2.11 - Другий фактор збільшення швидкості передачі даних

Перші два фактори належали до фізичного каналу. Третій важливий фактор збільшення продуктивності, рисунок 2.12 – оптимізація протоколу передачі даних на рівні доступу до середовища.

Було:

Підтвердження кожного кадра,
Великий проміжок часу між кадрами



Стало:

Підтвердження блоку кадрів,
Менший проміжок часу між кадрами



Рисунок 2.12 - Третій фактор збільшення швидкості передачі даних

У попередніх версіях кожен переданий кадр (порція даних) мав бути підтверджений приймальною стороною. У новій версії запроваджено блокове підтвердження, що дозволяє приймачеві надсилати одне підтвердження для кількох успішно прийнятих кадрів. Це зменшує навантаження на загальну пропускну здатність каналу через службові повідомлення. Крім того, зменшено часовий проміжок між кадрами, що також сприяло підвищенню корисної пропускну здатності [8].

2.2.3 MIMO-канал

У каналі можуть спостерігатися міжсимвольна інтерференція та частотна селективність. Проте в багатьох випадках тривалість імпульсів у бездротових системах зв'язку значно перевищує затримки сигналів, що надходять на приймальну антену. Це дає змогу ігнорувати міжсимвольну інтерференцію. Однак частотну селективність все ж слід враховувати. Наприклад, у системах стандарту IEEE 802.11, що використовують технологію OFDM, її не можна

ігнорувати. Водночас у деяких ситуаціях канал можна моделювати як канал без частотної селективності [7], як показано на рисунку 2.13.

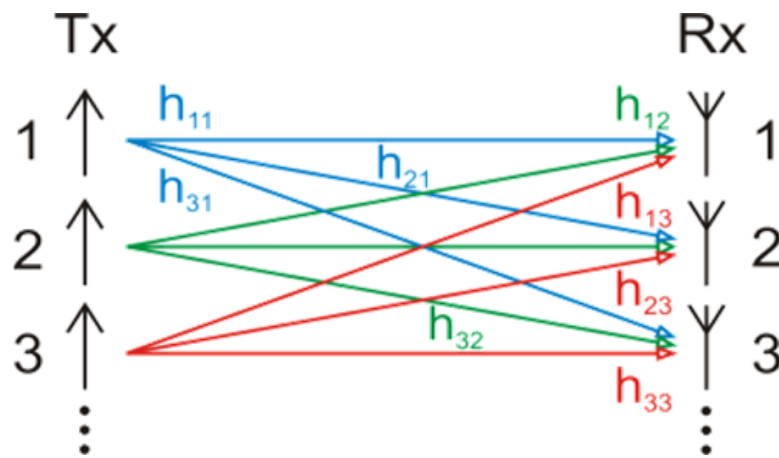


Рисунок 2.13 – Модель каналу MIMO

Розглянемо математичне обґрунтування моделі MIMO. У системі MIMO з N передаючими та M приймальними антенами властивості каналу, що з'єднує m -ий передавальний елемент з n -ним приймальним, описуються комплексними канальними коефіцієнтами h_{nm} . Ці коефіцієнти формують канальну матрицю H розміру $N \times M$. Їх значення випадково змінюються з часом через вплив багатопроменевого поширення сигналу [8].

Перетворення сигналів на передавальному та приймальному кінцях виконується за допомогою спеціальної діаграмотворчої схеми (ДТС).

S - матриця переданих сигналів;

Z - матриця власних шумів приймальних елементів антени;

X - матриця прийнятого повідомлення.

Сигнал на приймальній стороні записується так:

$$X=H \times S+Z \quad (2.5)$$

2.2.4 Обробка сигналів на приймальній стороні MIMO системи

Серед алгоритмів обробки сигналів на приймальній стороні можна виділити:

- алгоритми, основані на методі максимальної правдоподібності (ML, Maximum Likelihood);
- алгоритми, що використовують метод мінімальних середньоквадратичних відхилень (МСКО);
- алгоритми, засновані на методі обнулення (zero forcing, ZF).

Також можна розділити методи на ортогональні та неортогональні для кодування/декодування.

Основним завданням будь-якого методу є пошук рішень з-поміж усіх можливих, з мінімальною евклідовою відстанню між переданим символом та одним з можливих (2K) рішень.

Метод МСКО передбачає декодування прийнятого сигналу за формулою:

$$\hat{\theta} = (HH^{-1} - 2 \vec{\sigma}^2 * I) * HY \quad (2.6)$$

Метод обнулення здійснює декодування за формулою:

$$\hat{\theta} = (HH^{-1}) * HY \quad (2.7)$$

Метод максимальної правдоподібності базується на пошуку мінімальної відстані від прийнятого символу до одного з можливих значень сигнального сузір'я. Пошук методом «сліпого» перебору є найскладнішим, оскільки кількість операцій пропорційна K , де K — кратність маніпуляції [8].

2.2.5 Методи просторово-часового кодування MIMO

Блокові методи просторово-часового кодування. Принцип блокового кодування полягає у розподілі потоку даних на блоки та їх передачі в різні часові інтервали. Це реалізує концепцію повторної передачі даних і підвищує

завадостійкість системи MIMO. Однак блокові коди не забезпечують енергетичного виграшу за завадостійкістю (ЕВК). Простішою і більш поширеною схемою є схема Аламоуті, де дані в кодері розподіляються відповідно до матриці:

$$H = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

У цій схемі перша антена передає символи x_1 , а друга - x_2 . Кодова швидкість в даному випадку дорівнює 1, тому схема не підвищує швидкість передачі даних, але може захистити від негативних впливів замирань (з припущенням, що обидві антени не можуть одночасно знаходитися в умовах перешкод). Декодування здійснюється за принципом максимальної правдоподібності.

Гратчасте просторово-часове кодування. Пропускна здатність системи та її BER значною мірою залежать від вибраних алгоритмів декодування. Основні алгоритми декодування базуються на таких принципах:

- принцип максимальної правдоподібності;
- принцип мінімальної середньоквадратичної помилки;
- принцип обнулення (zero forcing, ZF);
- принцип гратчастого кодування, який передбачає присвоєння кожному переходу між символами унікальної послідовності біт, що формуються на основі заздалегідь відомого полінома.

Кодер STTC є комбінацією модулятора M-PSK або M-QAM та гратчастого кодера з заданим поліном (наприклад, кодера Вітербі).

Неортогональні методи просторово-часового кодування. Технологія BLAST (Bell Labs Space-Time Transformation) призначена для:

- розподілу потоків модульованих даних через кілька антенно-фідерних трактів приймально-передавального пристрою;
- розподілу вхідних модульованих сигналів за часовими слотами.

Існує два види алгоритму *BLAST*: алгоритм *BLAST* з діагональним розподілом часових слотів (*D-BLAST*) та алгоритм *BLAST* з вертикальним розподілом слотів (*V-BLAST*). Вони представлені відповідно на рис. 2.14 та 2.15.

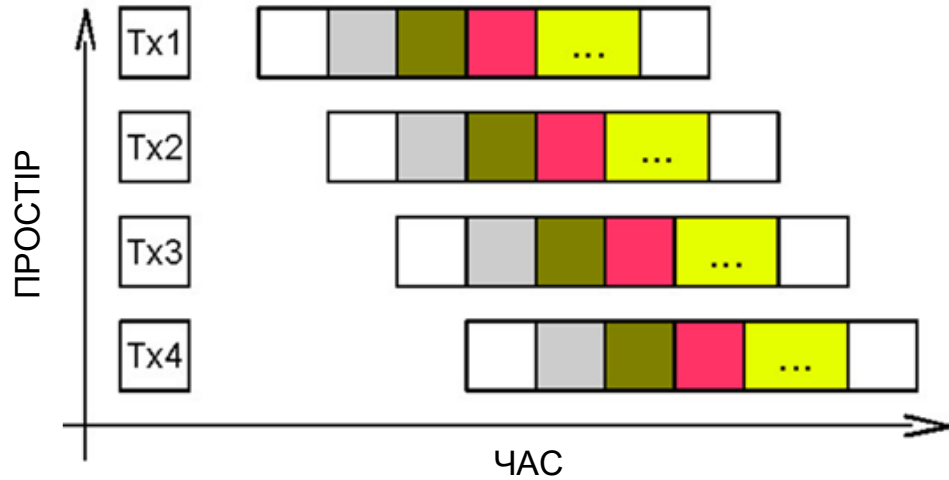


Рисунок 2.14 - Схема розподілу даних по просторово-часових слотах за методом *D-BLAST*

Перевагою першого алгоритму є можливість «розподілу» даних одного каналу як по просторових, так і по частотних каналах, а також у часових проміжках. Такий алгоритм застосовується в системах WiMax.

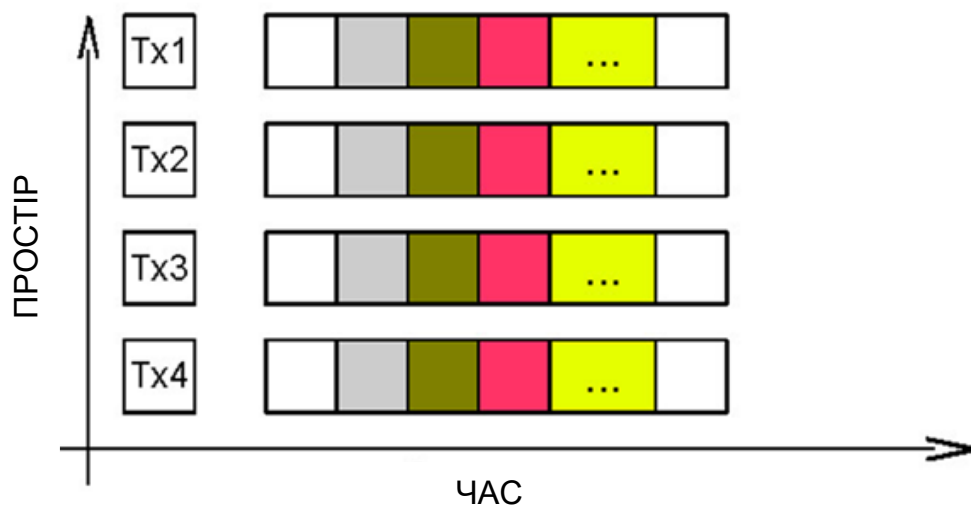


Рисунок 2.15 - Розподіл даних по просторово-часових слотах за методом *V-BLAST*

Серед недоліків цього алгоритму варто відзначити наявність часових втрат на початку та в кінці передачі, високу складність реалізації та проблеми з кодуванням.

Алгоритм *BLAST* з вертикальним розподілом слотів (*V-BLAST*), який показано на рисунку 2.15, має переваги: відсутність часових втрат, знижена складність і проста структура кодеків.

Просторовий поділ підканалів у системах MIMO може бути реалізований наступними способами:

- рознесення потоків із затримкою;
- рознесення за допомогою просторово-часового кодування (логічне продовження першого способу);
- ортогональне блочне кодування, зокрема метод Аламоуті;
- ортогональне кодування через пряме розширення діапазону (DSSS);
- впровадження діаграмотворчої схеми (ДОС);
- ортогональне розташування частот сигналів (несучих) передавальними трактами.

2.3 Технологія Mesh-мереж

Mesh-мережі — це новий і перспективний клас широкосмугових безпроводних інформаційних мереж, який широко використовується у локальних та розподілених міських бездротових системах (альтернатива WiMAX). Одним з основних принципів побудови mesh-мереж є самоорганізація архітектури, що забезпечує такі можливості, як топологія "кожен з кожним", стійкість до відмов окремих компонентів, масштабованість мережі (збільшення зони покриття в режимі самоорганізації) та динамічна маршрутизація трафіку з контролем стану мережі. Mesh-мережі можуть бути стаціонарними або мобільними, причому вузли мобільної мережі можуть включати кишенькові ПК, мобільні телефони тощо.

Wi-Fi мережі, що використовують технологію Mesh, можуть бути корисними у промислових умовах, де потрібні гнучкість і масштабованість, а також обслуговування великої кількості користувачів. Вони дозволяють створювати мережі з автоматичним відновленням з'єднань у разі відмови будь-якого вузла. Відповідні стандарти спрямовані на оптимізацію маршрутів у мережах з безпроводною комірчастою топологією та інтеграцію можливостей безпроводних комірчастих мереж (WMN — Wireless Mesh Networks) в існуючі мережі 802.11 на MAC-рівні.

Структура мережі WMN представлена на рисунку 2.16 і складається з чотирьох класів пристроїв:

1. Mesh Point (MP) — вузол комірчастої мережі, що виконує функції маршрутизації та передачі пакетів у комірчастій топології.
2. Mesh Access Point (MAP) — вузол комірчастої мережі з функцією точки доступу (AP), що дозволяє різним безпроводним пристроям, які підтримують стандарт 802.11, підключатися до WMN.

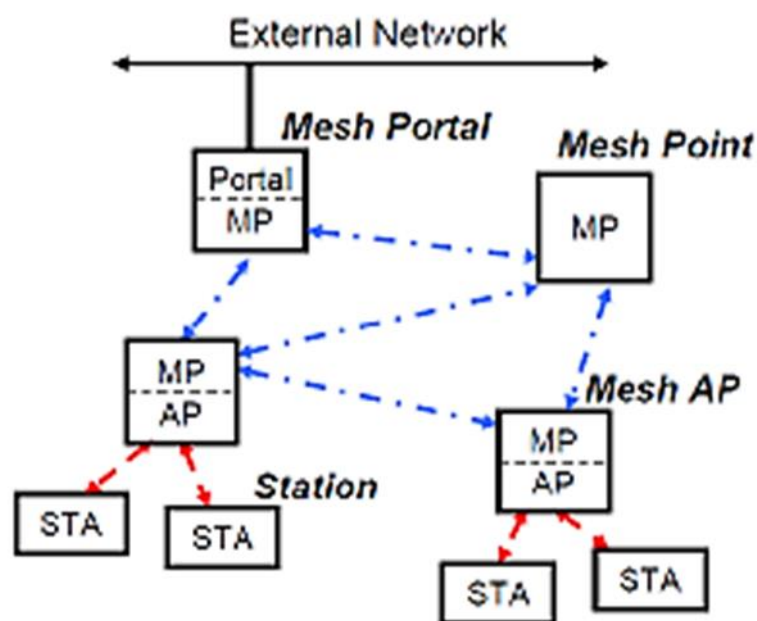


Рисунок 2.16 - Архітектура WMN мережі

1. Mesh Portal (MPP) — граничний вузол мережі (шлюз), який забезпечує зв'язок комірчастої мережі з зовнішньою провідною або безпроводною мережею (External Network).

2. Stations (STA) — безпроводні пристрої, що підтримують стандарт 802.11 і підключаються до вузла MAP.

У мережах стандарту 802.11 (абонентські станції) станції (STA) з'єднані лише з точками доступу (AP) та взаємодіють виключно з ними. AP мають вихід до інших мереж (наприклад, Ethernet), але не можуть обмінюватися даними між собою. У mesh-мережах, як показано на рисунку 2.16, крім термінальних станцій і точок доступу, є спеціальні пристрої — вузли mesh-мережі (Mesh Point - MP). Ці вузли можуть взаємодіяти між собою та підтримувати mesh-служби. Таким чином, mesh-мережа функціонально еквівалентна ширококомовній Ethernet-мережі, де всі вузли з'єднані на каналному рівні.

Слід зазначити, що зміни в стандартах Wi-Fi для mesh-мереж майже не стосуються фізичного рівня. Усі нововведення відносяться до MAC-підрівня каналного рівня. Крім того, під час впровадження цих змін розглядаються питання маршрутизації пакетів в рамках mesh-мереж, що виходить за межі початкових положень IEEE 802.11. Питання маршрутизації пакетів у mesh-мережах є важливим.

MDA-резервування.

Детермінований доступ до mesh-мережі (Mesh Deterministic Access – MDA) — це опціональний механізм, який дозволяє отримувати доступ до середовища в заздалегідь зарезервовані часові інтервали. Це зменшує конкуренцію за доступ до середовища передачі, що істотно підвищує ймовірність своєчасної доставки даних, чутливих до затримок (наприклад, аудіо- і відеопотоків, даних з високим пріоритетом тощо).

MDA-з'єднання можливе лише між станціями, що підтримують цей механізм. MDA-резервування визначає інтервали, під час яких MDA-станції не намагаються передавати пакети, щоб не заважати передачі даних по зарезервованому каналу.

При встановленні MDA-з'єднання вузол надсилає запит адресату, вказуючи, коли і які часові інтервали він бажає використати. Одержувач запиту виконує перевірки допустимості створення з'єднання з запропонованими параметрами та надсилає відповідь — позитивну або негативну. Якщо обрані часові інтервали перекриваються з іншими MDA-з'єднаннями, відомими одержувачу, він може запропонувати альтернативні часи. Для розриву MDA-з'єднання один з учасників надсилає спеціальні інформаційні елементи (MDAOP Set Teardown information element).

Усі пристрої, які знають про MDA-резервування, зобов'язані періодично повідомляти своїх сусідів про це (рекламувати) за допомогою інформаційних елементів MDAOP Advertisements, які включаються в керуючі пакети, зокрема бікони, або через спеціальні службові кадри MDA action frame. MDA-вузли зберігають список усіх резервувань, про які дізнаються з рекламних повідомлень і в яких беруть участь.

Синхронізація та бікони.

Стандарт IEEE 802.11 підтримує два режими роботи мережі: hot spot і ad hoc. У режимі hot spot одна з станцій виконує функцію точки доступу, і дані передаються лише між нею та іншими станціями. У режимі ad hoc передача можлива між будь-якими двома станціями.

У режимі hot spot точка доступу регулярно розсилає спеціальні кадри — бікони (beacon), основне призначення яких — синхронізація годинників станцій і надання інформації про сервіси та режими роботи точки доступу. Бікони містять спеціальне поле Timestamp, яке вказує час, коли перший біт бікона був переданий через радіоінтерфейс. Timestamp використовується для синхронізації годинників усіх станцій. Це важливо як для фізичного, так і для канального рівнів. Наприклад, у режимі модуляції з розширенням спектру методом частотних стрибків (FHSS) необхідно забезпечити одночасне перемикання всіх станцій на нову частоту. Синхронізація також має велике значення в режимі енергозбереження.

У режимі ad hoc бікони виконують таку ж функцію, як і в hot spot, але процес їх передачі є розподіленим — в ньому беруть участь усі станції. Тут можна передавати як бікони, так і АТІМ-кадри, використовуючи механізм енергозбереження.

Передача бікона відбувається за тим же механізмом конкурентного доступу з контролем несучої, що й для передачі даних. У момент ТВТТ кожна станція зупиняє свій лічильник часу відстрочення передачі даних і ініціює таймер передачі бікона випадковим числом слотів (одиниця дискретного часу в мережі 802.11), рівномірно обраним у діапазоні від нуля до певної константи ($2 \cdot aCW_{min}$). Якщо середовище передачі вільне протягом слота, станція зменшує значення таймера. Якщо одна з станцій починає передачу, інші зупиняють свої таймери на час передачі плюс інтервал DIFS. У випадку колізії (спроби одночасної передачі кількома станціями) використовується довший інтервал EIFS. Станція починає передачу бікона, коли значення її таймера досягає нуля. Всі станції скасовують передачу своїх біконів, якщо отримують бікон від будь-якої з них.

Енергозбереження.

МАР-вузли завжди залишаються активними, оскільки до них можуть звертатися пристрої, які не підтримують режим енергозбереження. Проте для пристроїв з автономним живленням (такі як датчики, ноутбуки, телефони тощо) збереження енергії є важливою задачею.

Вузли мережі повинні інформувати про свою здатність підтримувати енергозберігаючий режим. Для цього використовується інформаційне поле можливостей у біконах та у відповідях на пробні пакети. Перехід з активного режиму в режим енергозбереження (і навпаки) можливий лише після повідомлення всіх пристроїв, з якими встановлено з'єднання, про намір змінити режим. Для інформування сусідів про зміну режиму енергозбереження використовуються порожні пакети даних (null-data frame).

Маршрутизація.

У WMN використовуються три основні типи протоколів маршрутизації: реактивні, проактивні та гібридні. Головна відмінність між ними полягає в часі встановлення маршруту між двома вузлами. У протоколах із реактивним маршрутизацією шлях до призначеного вузла встановлюється під час необхідності передачі даних, тоді як у проактивних протоколах маршрути до більшості вузлів уже заздалегідь закладені в маршрутній таблиці. Гібридні протоколи, такі як HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol), здатні функціонувати як у реактивному, так і в проактивному режимах.

Очевидно, що кожен з цих режимів має свої переваги та недоліки. Проактивні протоколи забезпечують мінімальний час встановлення маршруту, але потребують більше обчислювальних ресурсів і можуть навантажувати мережу службовими пакетами. Реактивні протоколи, в свою чергу, підходять для мереж з динамічною топологією, використовують менше ресурсів, але потребують більше часу на встановлення маршруту.

Отже, в мережах WMN з відносно стабільною топологією, в порівнянні з класичними ad-hoc мережами, більш вигідними виглядають проактивні (RA-OLSR) та гібридні (HWMP) протоколи маршрутизації.

Метрики та профілі.

У стандарті використовується механізм профілів, формат яких має наступний вигляд: {ідентифікатор профілю; ідентифікатор протоколу маршрутизації; ідентифікатор метрики}. Обов'язковими є протокол маршрутизації HWMP та метрика Airtime Link Metric.

Airtime Link Metric визначається часом передачі пакета до сусіднього вузла, який обчислюється за формулою:

$$C_d = \left(O \frac{B_t}{r} \right) \frac{1}{1-e_f}, \quad (2.9)$$

де O - константа, що визначає час доступу до каналу залежно від фізичної реалізації; B_t - кількість бітів у тестовому пакеті (8192); r - швидкість передачі

даних у каналі (Мбіт/с); e_f - ймовірність виникнення помилки у тестовому пакеті (вимірюється експериментально для пакетів довжиною B_t).

За умовою, що помилки в пакеті виникають незалежно одна від одної, ймовірність помилки e_f можна обчислити так:

$$e_f = 1 - (1 - p_0)^n \approx np_0, \quad (2.10)$$

де p_0 - ймовірність виникнення бітової помилки під час передачі; n - кількість бітів у пакеті.

Ця метрика оцінює час передачі (в секундах) пробного пакета довжиною B_t з урахуванням можливих ретрансляцій у разі втрат у каналі. Хоча спосіб визначення параметрів r та e_f у стандарті не зазначений, можна припустити, що для цього використовують періодичну розсилку пробних пакетів довжиною $B_t = 8192$ біт [11].

Протокол маршрутизації HWMP.

HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) є гібридним протоколом, здатним працювати як у реактивному, так і в проактивному режимах маршрутизації.

Протокол HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) може працювати як у реактивному, так і в проактивному режимах маршрутизації, тому його вважають гібридним протоколом.

У реактивному режимі маршрутні таблиці в mesh-вузлах створюються безпосередньо перед передачею даних (за запитом RREQ). Перед початком передачі вузол-відправник формує ширококомовний запит Path Request (RREQ), який надсилається всім сусіднім вузлам. Ці вузли вносять необхідні зміни в поле метрики та пересилають запит далі. Вузол-одержувач отримує пакет RREQ, в якому вже міститься інформація про метрику всього шляху, і формує пакет підтвердження Path Reply (RREP), який відправляє назад відправнику. Отримавши пакет RREP, відправник зчитує інформацію про метрику шляху та приймає рішення про початок передачі даних, як показано на рисунку 2.17, а.

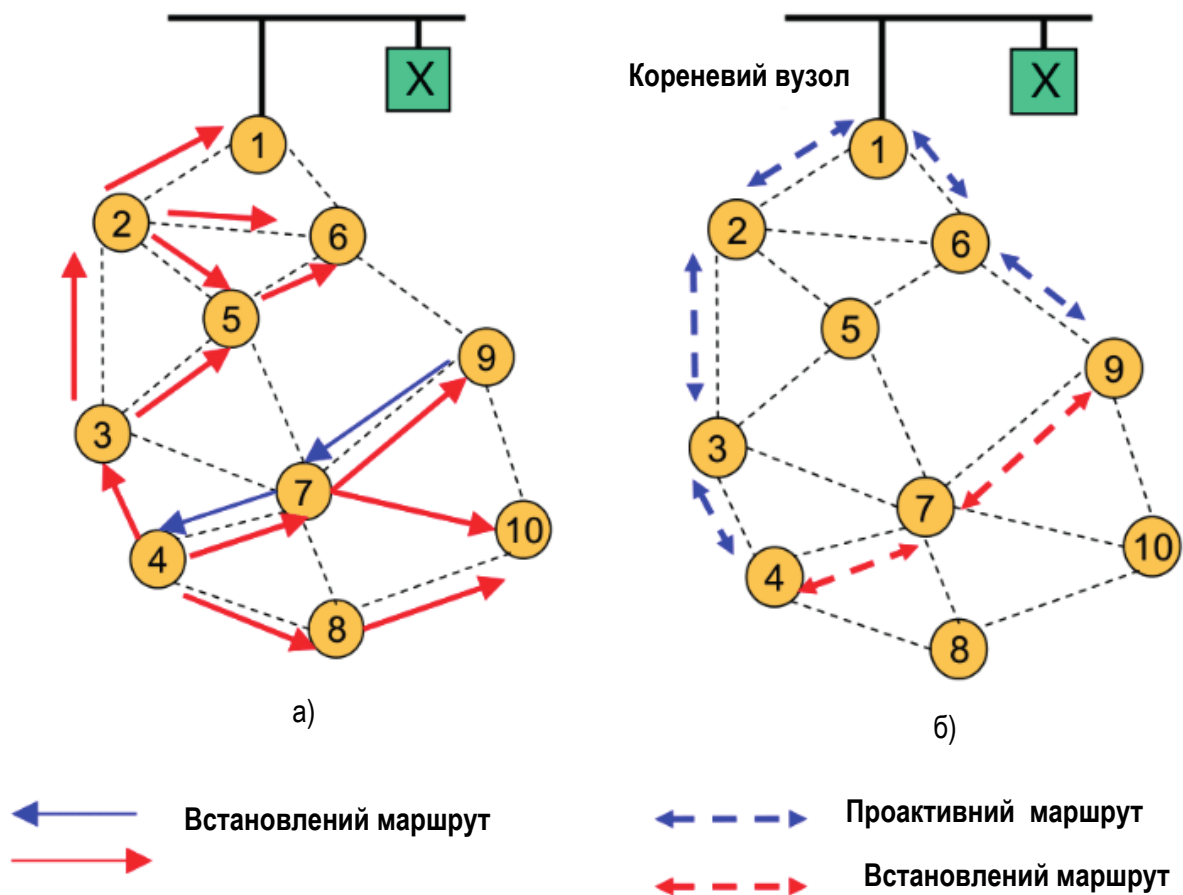


Рисунок 2.17 – Приклад побудови маршруту від вузла 4 до вузла 9 в реактивному (а) та проактивному (б) режимах

На відміну від реактивного режиму, де таблиця маршрутизації створюється під час потреби в передачі даних, проактивний режим передбачає наявність кореневого mesh-вузла. Цей вузол розсилає широкомовні запити RREQ, формуючи дерево шляхів з кореневим вузлом на вершині. Таким чином, коли виникає необхідність у передачі інформації, mesh-вузли вже мають готову таблицю маршрутизації, що дозволяє швидше встановити з'єднання з вузлом призначення, як показано на рисунку 2.17, б.

2.4 Технології BSS Coloring, TWT, beamforming

BSS Coloring — це цифровий код, що допомагає уникнути інтерференції, рисунок 2.18. Однією з причин повільної роботи Wi-Fi є взаємодія між точками

доступу. Стандарт Wi-Fi передбачає, що пристрої можуть передавати дані одночасно на одній частоті, використовуючи різні цифрові коди. Це дозволяє клієнтам аналізувати поточну передачу та оцінювати свій вплив на неї.

Зазвичай Wi-Fi використовує метод CSMA-CA (Carrier Sense with Multiple Access collision avoidance) для забезпечення того, щоб тільки одна станція могла передавати дані в канал в даний момент. Коли радіостанція IEEE 802.11 виявляє преамбулу іншої станції з рівнем сигналу, що перевищує шум на 4 дБ, вона відкладає свою передачу. Цей механізм доступу стає проблемою у щільно населених середовищах, де багато точок доступу або клієнтів використовують один і той же канал. Це сильно впливає на швидкість передачі даних. Всі затримки та очікування знижують ефективність, внаслідок чого реальна швидкість передачі може становити лише 55-65% від максимально можливої, а в деяких випадках передача стає настільки складною, що виникають серйозні труднощі.

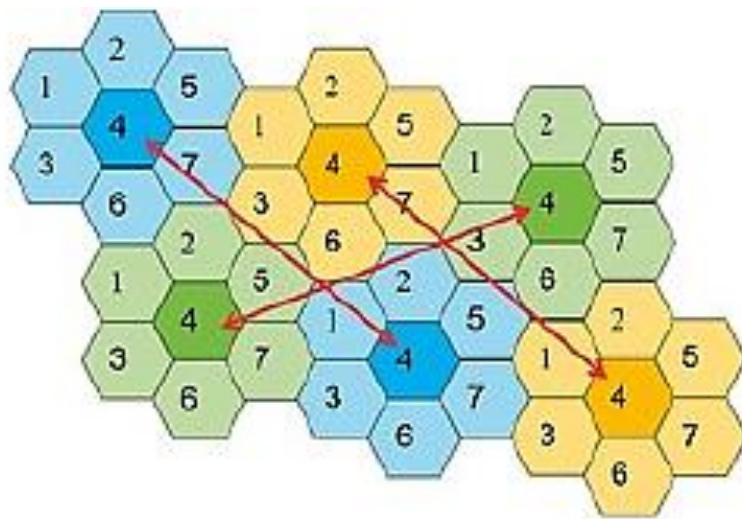


Рис 2.18 – Ілюстрація технології BSS Coloring

IEEE 802.11ax вирішує цю проблему, надаючи кожній зоні обслуговування унікальний числовий ідентифікатор, відомий як BSS Coloring. У рамках реалізації протоколу цей ідентифікатор представлений 6-бітовим полем у кадрі High Efficiency, яке може приймати значення від 1 до 63. Колір зони дозволяє

станціям ідентифікувати, з якої зони походить пакет даних, що сприяє більш ефективному використанню середовища і можливості одночасної передачі з іншими станціями.

Після визначення кольору, якщо він належить до того ж BSS, передача відкладається. Якщо пакет належить іншій BSS, оцінюється рівень RSSI. Якщо RSSI нижчий за визначений поріг, передача відбувається; якщо RSSI перевищує поріг, передача відкладається. Це дозволяє реалізувати одночасний множинний доступ до середовища у щільно населених середовищах, частково вирішуючи проблему прихованого вузла за умов відповідних порогових рівнів сигналів.

Алгоритм прийняття рішень щодо ідентифікації пакетів виглядає так:

- Станція виявляє радіопередачу.
- Використовуючи адаптивний механізм оцінювання чистоти каналу, визначається потужність прийнятого сигналу.
- Якщо потужність перевищує поріг (наприклад, -82 дБм), станція намагається демодулювати сигнал.
- При успішній демодуляції зчитується заголовок кадру.
- В заголовку знаходиться ідентифікатор (колір) зони обслуговування.
- Якщо колір збігається, це кадр всередині зони, і виконується стандартний процес CSMA/CA.
- Якщо колір не співпадає, це кадр між зонами.
- Перевіряється потужність сигналу; якщо вона вища за -62 дБм, середовище вважається зайнятим, інакше — вільним.

У разі конфлікту кольорів BSS — ситуації, коли кілька сусідніх BSS мають однаковий колір, точка доступу дізнається про це через два механізми: або отримуючи пакет від зовнішньої зони з однаковим кольором, або через повідомлення від клієнта у своїй зоні. Клієнти, виявивши, що інша BSS має той же колір, повинні надіслати звіт про подію до своєї точки доступу, включаючи інформацію про кольори інших BSS. Це допомагає точці доступу оновити колір BSS. Якщо конфлікт триває певний час, визначений стандартом, точка доступу ініціює процес зміни власного кольору BSS.

Слід зазначити, що коли одна точка доступу використовує декілька BSSID, усі віртуальні точки доступу, які розгорнуті в межах однієї фізичної точки, повинні мати однаковий колір BSS, щоб уникнути конфлікту використання середовища.

TWT (Target Wake Time) дозволяє точці доступу повідомляти клієнтам про заплановані інтервали, коли вони можуть підключатися, передавати дані та відключатися, що дає змогу ефективно керувати великою кількістю клієнтів та прогнозувати трафік. Клієнти, які використовують 802.11ax, споживають менше енергії, адже можуть вимикати радіопередавач, зберігаючи при цьому асоціацію з Wi-Fi, що є зручним для IoT-пристроїв, які не завжди передають дані, а роблять це з певними проміжками.

Старіші мобільні пристрої стандарту IEEE 802.11 мали функцію U-APSD (Unscheduled-Automatic Power Save Delivery), яка допомагала економити енергію шляхом відключення радіомодулів бездротових адаптерів, коли вони не використовувалися. Для цього використовувався буфер даних з відкладеною передачею, а точка доступу сигналізувала про наявність даних у буфері через періодичні сповіщення TIM (Traffic Identification Message). Це дозволяло клієнту вимикати свою радіостанцію для економії енергії, періодично вмикаючи її для отримання сповіщень чи даних. Проте недоліком цієї функції було те, що пристрої Інтернету речей мусили часто вмикати радіостанцію для отримання сповіщень, хоча доступ до мережі їм потрібен рідше.

IEEE 802.11ax впроваджує новий механізм планування ресурсів у складі OFDMA. Функція TWT (цільовий час пробудження) знижує потребу в частих кадрах-сповіщеннях. Завдяки кадрам налаштування TWT між клієнтом і точкою доступу можна узгодити запланований графік. Кожен клієнт може мати до 8 запланованих пробуджень для різних типів трафіку. Стандарт також передбачає розширену неузгоджену можливість планування TWT. Точка доступу формує графік пробудження та передає його клієнтам під час широкомовної процедури TWT. Клієнту, що запитує TWT, призначається конкретний час пробудження, після чого він виходить з режиму сну, обмінюється кадрами з точкою доступу і

оновлює інформацію про графік пробудження, а точка доступу, у свою чергу, коригує свій графік відповіді.

При використанні явного TWT клієнт отримує конкретний графік. У випадку неявного TWT клієнт самостійно обчислює наступний сеанс TWT, додаючи фіксоване значення до поточного значення TWT.

Використання механізму цільового часу пробудження дає значну економію енергії. Деякі виробники оцінюють збільшення терміну служби батареї до 700%.

Beamforming — це технологія, що дозволяє динамічно налаштовувати діаграму спрямованості антен. Завдяки цій функції зона покриття точки доступу оптимізується відповідно до розташування клієнтів. Beamforming є частиною стандарту 802.11n, а в 802.11ac ця функція стає обов'язковою.

Beamforming фокусується на бездротових станціях (STA), направляючи радіосигнали в конкретних напрямках, що покращує силу сигналу (RSIS) та збільшує пропускну здатність. Ця технологія активно використовується в нових стандартах Wi-Fi.

Стандарти Wi-Fi були розроблені для підвищення швидкості передачі даних. З моменту впровадження Wi-Fi 4 (802.11n) з технологією MIMO (multiple-input, multiple-output) і beamforming, швидкість передачі досягає сотень мегабіт за секунду і навіть більше.

Технологія MIMO підвищує швидкість передачі, використовуючи кілька антен для передачі даних. Проте, на практиці STAs зазвичай мають лише одну або дві антени, що призводить до різниць у підсиленні між сигналами передачі та прийому. Коли STA відправляє сигнали на AP, точка доступу може використовувати свою багатоантенну систему для покращення прийому і підвищення сили сигналу. Проте під час зворотної передачі, якщо AP використовує лише антену, що відповідає антені на STA, можливості підсилення не реалізуються. Для вирішення цієї проблеми впроваджується beamforming, що дозволяє AP та STAs досягати вищих швидкостей передачі, покращуючи RSIS STAs.

Для повного використання багатоканальних ресурсів у Wi-Fi 5 (802.11ac) впроваджено технологію MU-MIMO (Multi-User MIMO), яка дозволяє точці доступу одночасно надсилати сигнали кільком STA, підвищуючи ефективність бездротового з'єднання. MU-MIMO базується на beamforming, оскільки ця технологія комбінує сигнали з кількох антен точки доступу, даючи змогу кожному STA отримувати лише свої сигнали під час MU-MIMO, що зменшує перешкоди. Останнє покоління стандартів Wi-Fi 6 (802.11ax) додатково збільшує кількість підтримуваних користувачів MU-MIMO, що також стало можливим завдяки beamforming.

Розглянемо принцип роботи beamforming. Сигнальні промені можна порівняти зі світловими променями. Ліхтарик створює фіксований світловий промінь, і якщо інший ліхтарик спрямований у тому ж напрямку, два світлових променя накладаються один на одного, що підсилює сигнал і змінює його яскравість та форму. При використанні кількох ліхтарів яскравість і форма комбінованого променя продовжують змінюватися, а при регулюванні інтенсивності світла також змінюється його форма.

У бездротовому зв'язку антена випромінює радіосигнали, подібно до ліхтарика. Коли використовуються кілька антен, форма радіосигналу може коригуватися шляхом управління сигналами, що передаються кожною антеною.

У багатоантенній системі, якщо сигнали від різних антен приходять в одну точку, можливе їх придушення, якщо два промені мають однакову амплітуду, але протилежні фази. Технологія beamforming дозволяє оптимально комбінувати ці промені, здійснюючи попередню компенсацію фаз сигналів, що передаються антенами.

Рисунок 2.19 (верхній) ілюструє явище повного придушення сигналів, що виникає, коли сигнали від антен А та В доходять до точки прийому (STA) з протилежними фазами. На нижньому рисунку (рис. 2.19) показано випадок підсилення сигналів антен А та В у точці прийому (STA) завдяки їх синфазності. Цей принцип лежить в основі технології beamforming, яка концентрує радіосигнал на певному STA.

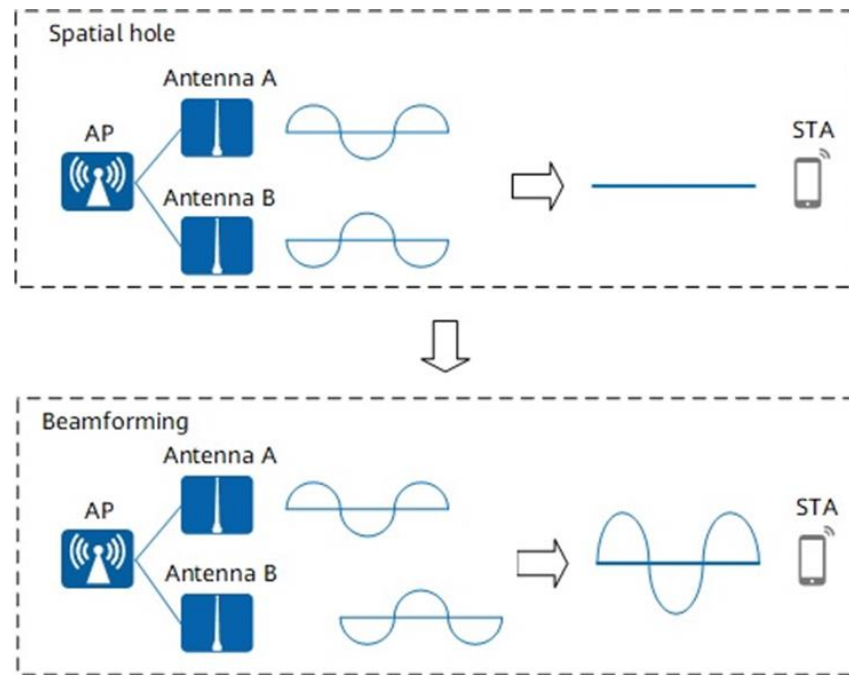


Рисунок 2.19 – До пояснення технології beamforming

Beamforming отримує та обчислює параметри для налаштування шляхом виявлення інформації про стан каналу (CSI). Залежно від режимів отримання CSI beamforming може бути реалізований у явному чи неявному режимі.

2.5 Висновки до розділу

Результати аналізу умов роботи Wi-Fi в промислових середовищах свідчать про те, що такі системи мають бути оснащені технологіями, які забезпечують їх надійність та ефективність. Найсучасніші версії стандартів 802.11, безумовно, включають ці передові технології. Проведено аналіз основних технологій Wi-Fi-систем і продемонстровано їхню ефективність у зазначених умовах.

Використання завадостійких модуляцій, таких як OFDM та OFDMA, підвищує стійкість до електромагнітних завад і зменшує ймовірність помилок. Ця технологія є особливо ефективною для боротьби з наслідками багатопроменевого поширення хвиль, зокрема міжсимвольною інтерференцією. Технологія MU-MIMO дозволяє одночасну передачу даних кільком користувачам в різних напрямках, що підвищує продуктивність і ефективність

мережі в умовах високого навантаження. Мережі Mesh забезпечують гнучке та надійне рішення для покриття великих промислових об'єктів, створюючи розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла.

Окрім того, представлені алгоритми роботи та проаналізовані особливості функціонування систем Wi-Fi з використанням технологій BSS Coloring, TWT і beamforming. Дослідження показало, що їх застосування сприяє підвищенню надійності передачі даних, зменшенню затримок і значній економії енергії. Зокрема, beamforming дозволяє спрямовувати Wi-Fi сигнал у певному напрямку, покращуючи дальність та стабільність з'єднання, особливо в умовах високого рівня завад або в обмежених просторах.

3 ПРИКЛАДНА ОЦІНКА СТАНДАРТІВ Wi-Fi

3.1 Промисловий Wi-Fi: раціональні рішення для організації мереж передачі даних

Принцип роботи промислового Wi-Fi схожий на звичайні бездротові мережі, які забезпечують високошвидкісний доступ до Інтернету через радіохвилі. Хоча основна архітектура та принципи дії в них спільні, між стандартними і промисловими бездротовими рішеннями є важливі відмінності. Ці відмінності пов'язані з підвищеними вимогами до надійності, безпеки та швидкості передачі даних в агресивному середовищі. Іншими словами, у промисловому Wi-Fi основні завдання зосереджені на стабільності та захищеності мережі.

Промислові бездротові мережі передачі даних використовують спеціалізоване Wi-Fi обладнання, що забезпечує надійне покриття великих територій, виробничих і складських приміщень. Управління такою мережею відбувається з єдиного центру, а всі компоненти, включаючи точки доступу та маршрутизатори, виконані в промисловому стандарті з урахуванням захисту від зовнішніх впливів.

Промисловий Wi-Fi є мережею з самоадаптивною і самовідновлювальною структурою. Коли пристрій підключається, він автоматично визначає стан сусідніх вузлів і починає виконувати свою функцію в загальній топології. У разі виходу з ладу однієї точки система перенаправляє дані по оптимальному маршруту без втрат у якості або часі. Такі бездротові мережі можуть ефективно використовуватись на гірничодобувних підприємствах та в промислових об'єктах, а їх комірчаста структура забезпечує високу стабільність роботи Wi-Fi.

Технологія Wi-Fi працює як підмережа в підприємницькій мережі, реалізуючи зіркоподібну топологію, де в центрі розташована точка бездротового доступу (WAP), а навколо неї можуть бути підключені кілька вузлів через цифрові приймально-передавальні пристрої, рисунок 3.1.

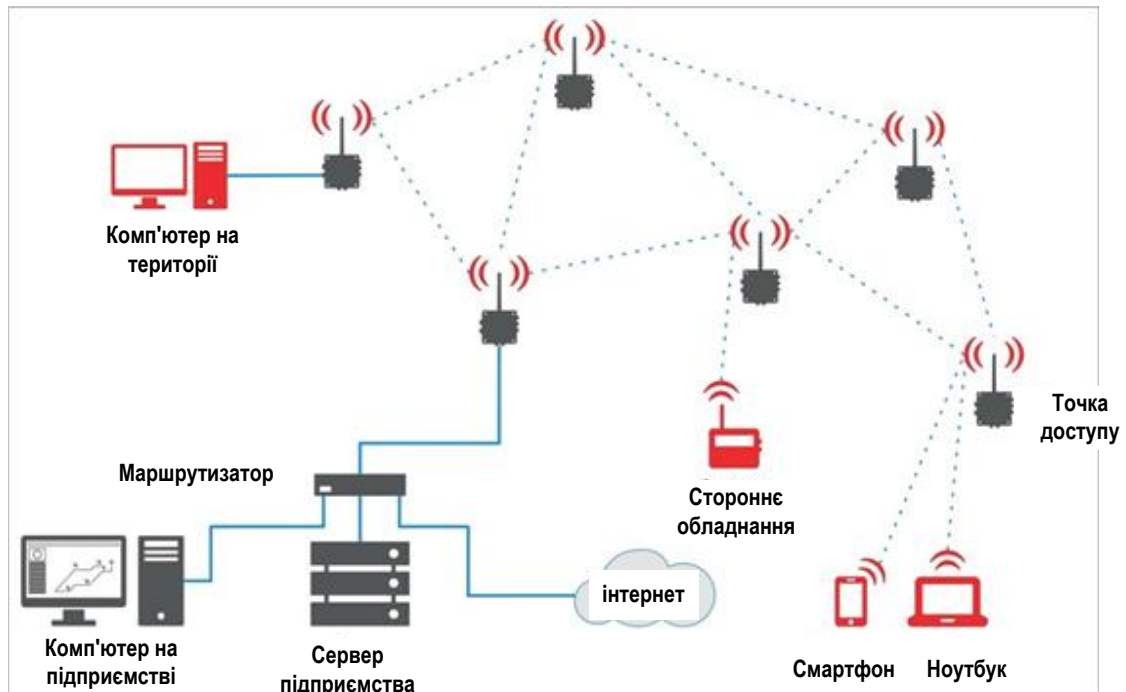


Рисунок 3.1 – Схема промислового Wi-Fi

Коли термінальне обладнання, наприклад кишеньковий ПК, потрапляє в зону покриття WAP, воно намагається підключитися до безпроводної мережі. Мережі можуть бути захищеними (для підключення потрібно мати код аутентифікації) або відкритими (підключитися може будь-яке обладнання). Залежно від умов, зв'язок може бути надійним на відстані приблизно 30 метрів у приміщенні та трохи більше на відкритому повітрі.

Для роботи пристроїв введення-виводу використовуються спеціальні функції, такі як PCF, яка реалізує детермінований режим зв'язку шляхом опитування, що дозволяє точці доступу періодично аналізувати підключені пристрої.

Антенні технології, включаючи радіочастотні коаксіальні кабелі, забезпечують зв'язок з рухомими об'єктами. Наприклад, на заводі Volkswagen в Емдені коаксіальні кабелі використовуються в критично важливих областях з радіосистемами, зокрема на мобільних сервісних станціях. Тут термінальне обладнання підтримує надійний зв'язок із системою контролю заводу та обслуговуванням конвеєрної лінії.

Перед початком побудови безпроводної мережі рекомендується провести радіообстеження, проте це має сенс лише для вже збудованих об'єктів, де є перешкоди (стелажі, товари, металеве обладнання тощо). Якщо радіообстеження проводити в порожньому приміщенні, результати можуть сильно відрізнятись після встановлення стелажів, що робить такі дослідження малоефективними. Тому доцільно використовувати точки доступу з зовнішніми спрямованими антенами, які встановлюють між рядами стелажів. Це дозволяє зміцнити сигнал, збільшити відстань між точками доступу, зменшити їх кількість і, відповідно, зекономити на ліцензіях для безпроводного контролера.

Другим ключовим аспектом планування бездротової мережі на підприємстві є підключення точок доступу та якість використовуваних матеріалів. Оскільки промислові об'єкти часто містять багато обладнання, яке може створювати радіоперешкоди, оптимальним рішенням буде використання екранованого кабелю для зменшення впливу зовнішніх факторів на передачу сигналу до точки доступу.

Сьогодні Wi-Fi став основою комунікацій, поступово витісняючи традиційний дротовий Ethernet, навіть у зонах з інтенсивним інтернет-трафіком. Хоча захист мережі не є надто складним завданням, він вимагає особливої уважності від тих, хто встановлює обладнання. Ранні мережі Wi-Fi використовували алгоритм WEP (Wired Equivalent Privacy), включений до стандарту IEEE 802.11, який був розроблений для широкого споживчого ринку. Спочатку цього було достатньо для захисту домашніх мереж, але у 2003 році з'явився алгоритм WPA, що покращив безпеку. Згодом ці протоколи були зламані, і в 2006 році було запроваджено WPA2, який, хоч і піддавався злому, вимагав значних зусиль і часу.

Хакери намагаються отримати доступ до підприємницьких мереж, використовуючи їх уразливі місця. Основною проблемою для них є наближення до джерела Wi-Fi сигналу. Найбільшою загрозою є можливість доступу до корпоративної мережі через виробничу мережу, де зберігаються критично

важливі дані. Тому одним із основних аспектів кібербезпеки є захист цих даних на виробництві.

Звичайно, уважність і відповідальна поведінка персоналу є пріоритетом. Проте, не слід ігнорувати такі дії:

- Замінити всі маршрутизатори, випущені до 2006 року, на нові.
- Налаштувати всі мережі на використання WPA2.
- Використовувати складніші паролі.

Розглянемо ці заходи детальніше. Маршрутизатори, що випущені до 2006 року, можуть все ще працювати, але якщо вони не підтримують WPA2, їх слід замінити. Також важливо перевірити нові маршрутизатори на наявність цієї функції. Критично важливими для створення пароля є його довжина і різноманітність символів, включаючи цифри та використання літер верхнього і нижнього регістру. Стандарти безпеки Wi-Fi наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Стандарти безпеки IEEE 802.11

Роки використання	Протокол	Ефективність
1999-2003	WEP	Просто зламати, використовуючи звичайні інструменти
2003-2006	WPA спільно з TKIP або AES	Краще, ніж WEP, але може бути зламаний
З 2006 і до теперішнього часу	WPA2 спільно з AES і CCMP	Важко зламати

Стосовно управління паролями, тот тільки системний адміністратор конкретної мережі повинен знати всі паролі доступу. Згадані заходи безпеки ефективні та прості у реалізації. Персонал, відповідальний за Wi-Fi, повинен підтримувати відповідний рівень захисту мереж.

3.2 Стандарти Wi-Fi для промислових середовищ

Останні роки експлуатації Wi-Fi у промисловості свідчать про переважне використання стандартів, які забезпечують надійне з'єднання, високу продуктивність і стійкість до завад. Вибір конкретного стандарту Wi-Fi залежить від специфічних потреб і вимог промислового підприємства, таких як щільність пристроїв, швидкість передачі даних, а також вимоги до дальності та надійності з'єднання.

Розглянемо особливості декількох стандартів і визначимо, які технологічні рішення роблять їх привабливими для використання в промисловості. Далі зосередимося на аналізі їх енергетичної та спектральної ефективності.

3.2.1 Стандарт 802.11n (Wi-Fi 4)

Стандарт 802.11n має численні удосконалення порівняно з попередніми версіями. Основні переваги 802.11n:

- Збільшення швидкості передачі даних
- Розширення зони покриття
- Підвищення надійності передачі сигналу
- Зростання пропускної спроможності

Стандарт 802.11n працює в діапазонах 2.4 ГГц і 5.0 ГГц. На фізичному рівні реалізовано вдосконалену обробку сигналу та модуляцію, а також можливість використання чотирьох антен. На каналному рівні управління доступом до середовища (MAC) впроваджено більш ефективне використання доступної пропускної здатності. Це дозволяє досягати максимальної теоретичної швидкості передачі до 600 Мбіт/с (порівняно з 54 Мбіт/с у стандартах 802.11a/g).

Важливим аспектом стандарту 802.11n є підтримка технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), яка дозволяє одночасний прийом і передачу кількох потоків даних через кілька антен.

Стандарт 802.11n визначає різні конфігурації антен "MxN" (найпоширеніші — "3x3" або "2x3"). У цих конфігураціях M означає кількість передавальних антен (T), а N — кількість приймальних антен (R). На рисунку 3.2

представлена точка доступу з двома передавальними і трьома приймальними антенами ("2x3").

Чим більше антен використовує пристрій стандарту 802.11n, тим вища максимальна швидкість передачі даних. Однак головним аспектом є вдосконалення методів обробки сигналу, що визначає алгоритм роботи MIMO-пристроїв.

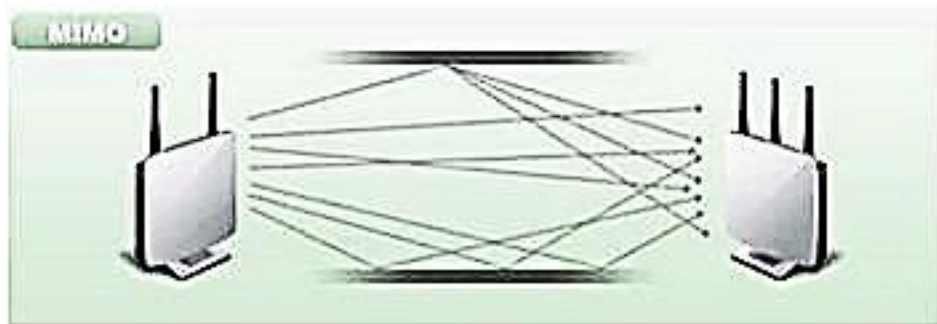


Рисунок 3.2 – Точка доступу з двома передавальними та трьома приймальними антенами

При використанні модуляції 64-QAM конфігурація «4x4» забезпечує швидкість до 600 Мбіт/с, а «3x3» — до 450 Мбіт/с. Конфігурації «2x3» та «1x2» можуть досягати швидкості до 300 Мбіт/с. З використанням MIMO «2x2» і модуляції 256-QAM (TurboQAM) на частоті 2,4 ГГц максимальна швидкість у стандарті становить 400 Мбіт/с. За таких же умов, але з MIMO «4x4», максимальна швидкість досягає 800 Мбіт/с. Ще однією важливою особливістю стандарту 802.11n є розширення ширини каналу з 20 МГц до 40 МГц. Цей стандарт підтримує роботу на частотах 2,4 ГГц і 5 ГГц.

У діапазоні 2,4 ГГц доступно 13 каналів (в деяких країнах — 11), з інтервалами 5 МГц між ними. Бездротові пристрої стандарту 802.11b/g використовують канали шириною 20 МГц, але фактично задіюють 5 перекриваючих каналів. Наприклад, якщо точка доступу працює на каналі 6, це призводить до завад у каналах 5 і 7, а також у каналах 4 і 8. Передаючи радіосигнал, пристрій має частотне відхилення від центральної частоти каналу в межах +/- 11 МГц, а іноді до 30 МГц. Щоб уникнути перешкод між каналами, їх

смути мають бути розташовані на відстані 25 МГц одна від одної. Таким чином, залишається всього 3 неперекриваючі канали на ширині 20 МГц: 1, 6 і 11, а при ширині каналу 40 МГц — канали 3 і 11.

Бездротові точки доступу, що працюють у смузі частот 2,4 ГГц, в межах однієї зони обслуговування повинні уникати перекриття каналів для забезпечення стабільної роботи мережі, як показано на рисунку 3.3.

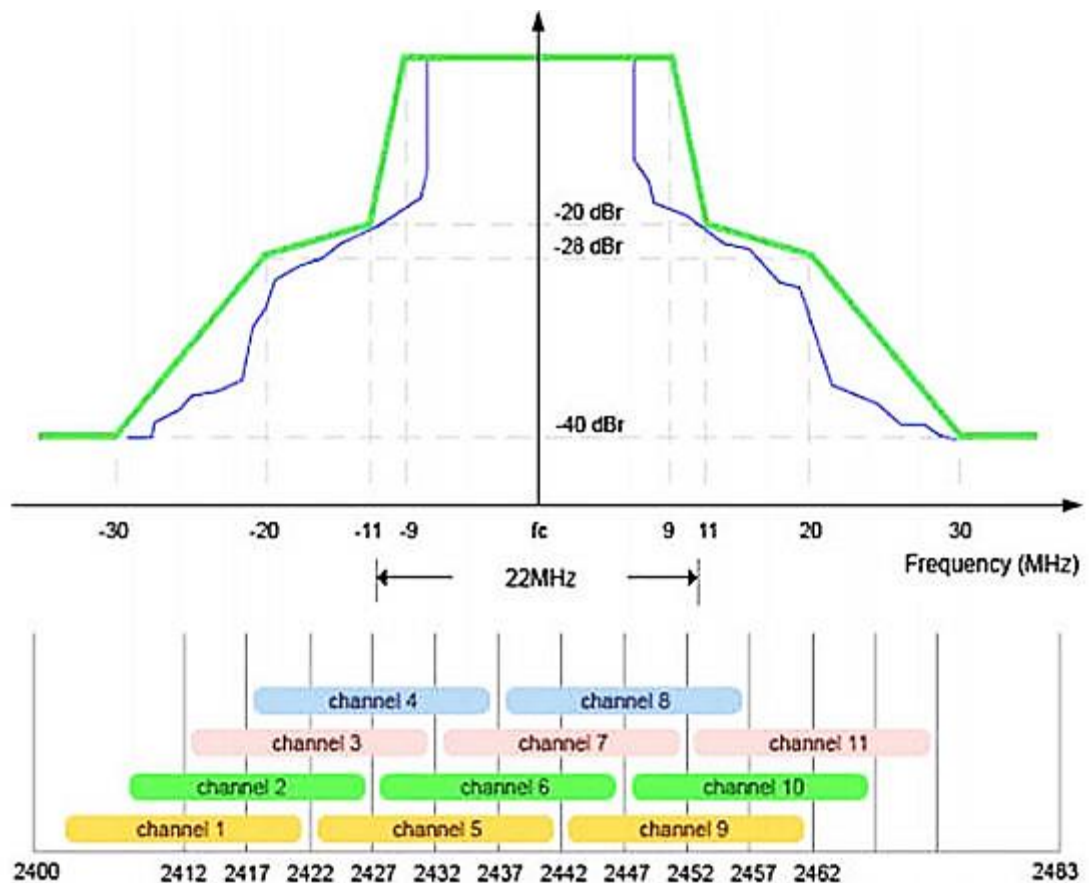


Рисунок 3.3 – Частотні канали на частоті 2,4 ГГц

Одним із ключових аспектів є сумісність бездротових пристроїв стандарту 802.11n з пристроями 802.11a/b/g. Більшість бездротових локальних мереж 802.11n використовують канали шириною 40 МГц виключно на частоті 5 ГГц, де проблеми з перекриттям каналів не виникають. Пристрої стандарту 802.11n можуть працювати з шириною каналу 20 або 40 МГц у діапазонах 2,4 або 5 ГГц. Використання каналу 40 МГц забезпечує подвоєння пропускної спроможності

порівняно з 20 МГц, як у випадку з пристроями 802.11b/g. На частоті 5 ГГц доступно 19 неперекриваючих каналів, і на цій частоті сигнали 802.11n із шириною 40 МГц не заважають один одному. Однак використання 40 МГц у пристроях 802.11n може зазнавати впливу існуючих точок доступу 802.11b/g, що призводить до зниження продуктивності всієї мережі.

Стандарт 802.11n має три режими роботи: HT, Non-HT та HT Mixed. Аналіз показує, що найближчими роками найпоширенішим режимом для точок доступу 802.11n буде змішаний режим HT Mixed, де удосконалення стандарту можуть використовуватися в спільних зонах з пристроями 802.11b/g. У цьому режимі точка доступу 802.11n визначає наявність старих клієнтів і автоматично знижує швидкість передачі даних, поки старі пристрої передають інформацію.

Щоб повністю реалізувати переваги стандарту 802.11n, необхідно "заморозити" використання стандарту 802.11b/g і працювати в "чистому" режимі HT. Значення індексу модуляції MCS наведені в таблиці 3.2.

Стандарт 802.11n визначає індекс модуляції та схеми кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). MCS — це просте ціле число, що відповідає кожному варіанту модуляції (всього можливі 77 варіантів). Кожен варіант визначає тип модуляції, швидкість кодування, захисний інтервал та швидкість передачі даних. Поєднання цих параметрів визначає реальну фізичну (PHY) або каналну швидкість передачі даних, яка варіюється від 6,5 Мбіт/с до 600 Мбіт/с, що досягається завдяки використанню всіх можливостей стандарту 802.11n.

Тип модуляції та швидкість кодування визначають вид символу, який передається через радіоефір. Спочатку використовувалася модуляція BPSK, яка, хоч і не забезпечує високих швидкостей, є дуже завадостійкою. Сучасні методи модуляції, такі як 64-QAM, разом із вдосконаленими методами кодування, забезпечують вищі швидкості передачі даних, але застарілі методи все ще підтримуються для зворотної сумісності.

Таблиця 3.2 – Значення індексу модуляції та схеми кодування

	Type			Data rate (Mbps)	Data rate (Mbps)
--	------	--	--	------------------	------------------

NCS index		Coding rate	Spatial streams	with 20 MHz CH		with 40 MHz CH	
				800 ns	400 ns (SGI)	800 ns	400 ns (SGI)
0	BPSK	1/2	1	6.50	7.20	13.50	15.00
1	QPSK	1/2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
2	QPSK	3/4	1	19.50	21.70	40.50	45.00
3	16 QAM	1/2	1	26.00	28.90	54.00	60.00
4	16 QAM	3/4	1	39.00	43.30	81.00	90.00
5	64 QAM	2/3	1	52.00	57.80	108.00	120.00
6	64 QAM	3/4	1	58.50	65.00	121.50	135.00
7	64 QAM	5/6	1	65.00	72.20	135.00	150.00
8	BPSK	1/2	2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	QPSK	1/2	2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	QPSK	3/4	2	39.00	43.30	81.00	90.00
11	16 QAM	1/2	2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	16 QAM	3/4	2	78.00	86.70	162.00	180.00
13	64 QAM	2/3	2	104.00	115.60	216.00	240.00
14	64 QAM	3/4	2	117.00	130.00	243.00	270.00
15	64 QAM	5/6	2	130.00	144.40	270.00	300.00
16	BPSK	1/2	3	19.50	21.70	40.50	45.00
...	...	...	...	...	...	...	...
31	64 QAM	5/6	4	260.00	288.90	540.00	600.00

Наприклад, для досягнення максимальної швидкості з'єднання 300 Мбіт/с обидва пристрої — точка доступу і бездротовий адаптер — повинні підтримувати два просторові потоки (Spatial Streams) та ширину каналу 40 МГц. З отриманої швидкості з'єднання можна точно визначити, скільки потоків і яка ширина каналу використовувалася. Швидкості з'єднання 65 або 130 Мбіт/с свідчать про те, що один із пристроїв — або точка доступу, або адаптер — працює з одиничною шириною каналу 20 МГц.

Розглянемо деякі параметри детальніше. Короткий захисний інтервал (SGI, Short Guard Interval) визначає час між символами, що передаються. Цей інтервал допомагає зменшити затримки, викликані відлунням та міжсимвольними перешкодами. У пристроях стандарту 802.11n є можливість використовувати паузу в 400 нс (замість 800 нс у 802.11b/g). Зменшення інтервалу може призвести до зростання перешкод та зниження пропускної спроможності, в той час як збільшення інтервалів зменшує ефективність використання каналу.

Використання короткого захисного інтервалу може підвищити швидкість передачі даних на 11 відсотків.

Точки доступу 802.11n повинні підтримувати значення MCS від 0 до 15, тоді як станції 802.11n повинні підтримувати значення MCS від 0 до 7. Інші значення MCS, включаючи ті, що пов'язані з шириною каналу 40 МГц і коротким захисним інтервалом (SGI), є опціональними. Визначення значень MCS та SGI для всіх пристроїв 802.11n є корисним для оцінки можливих швидкостей передачі даних у бездротовій мережі.

Стандарт 802.11n використовує ті ж засоби безпеки, що й 802.11i (WPA2), які були раніше впроваджені в пристроях 802.11a/g. Крім того, VPN може бути використано для захисту кадрів 802.11n, хоча для цього VPN-шлюзи повинні підтримувати вищу пропускну спроможність.

3.2.2 Стандарт 802.11ac (Wi-Fi 5)

Стандарт був впроваджений у 2014 році. Максимальна пропускну здатність для діапазону 5 ГГц з шириною каналу 80 МГц становить [10]:

- для одного пристрою — не менше 500 Мбіт/с;
- для кількох пристроїв — не менше 1 Гбіт/с.

Мінімальні вимоги до обладнання стандарту 802.11ac передбачають швидкість 293 Мбіт/с у смузі 80 МГц для одного користувача.

Стандарт IEEE 802.11ac також забезпечує зворотну сумісність з пристроями стандартів IEEE 802.11a/n.

Швидкість бездротового доступу стандарту 802.11ac залежить від трьох основних факторів: ширини каналу, щільності сигнального поля та кількості просторових потоків.

Основні параметри стандарту 802.11ac з урахуванням класу абонентських пристроїв наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні параметри стандарту IEEE 802.11ac

Номинальна конфігурація (клас) пристроїв	Смуга каналу, МГц	Кількість просторових потоків	Сигнальне сузір'я та швидкість кодування	Захисний інтервал	Швидкість потоку на фізичному рівні, Мбіт/с
Мінімально можлива	80	1	64КАМ 5/6	довгий (800 мкс)	293
Низький клас	80	1	256КАМ 5/6	короткий (400 мкс)	433
	160				867
Середній клас	80	2			867
	160				1730
Високий клас	80	3			1300
	160				2600
	160	4			3470
	80	8			3470
Максимально допустима	160	8			6930

Формування частотних каналів.

На відміну від пристроїв 802.11n, які захоплюють діапазон 2,4 ГГц, стандарт IEEE 802.11ac визначає роботу обладнання тільки в діапазоні 5 ГГц. Відмова від 2,4 ГГц обумовлена тим, що на цих частотах працює багато пристроїв.

Всі канали IEEE 802.11ac розміщуються в трьох сегментах діапазону, рисунок 3.4 [9, 10]:

- 5,170 – 5,330 ГГц;
- 5,490 - 5,730 ГГц;
- 5,735 – 5,835 ГГц.

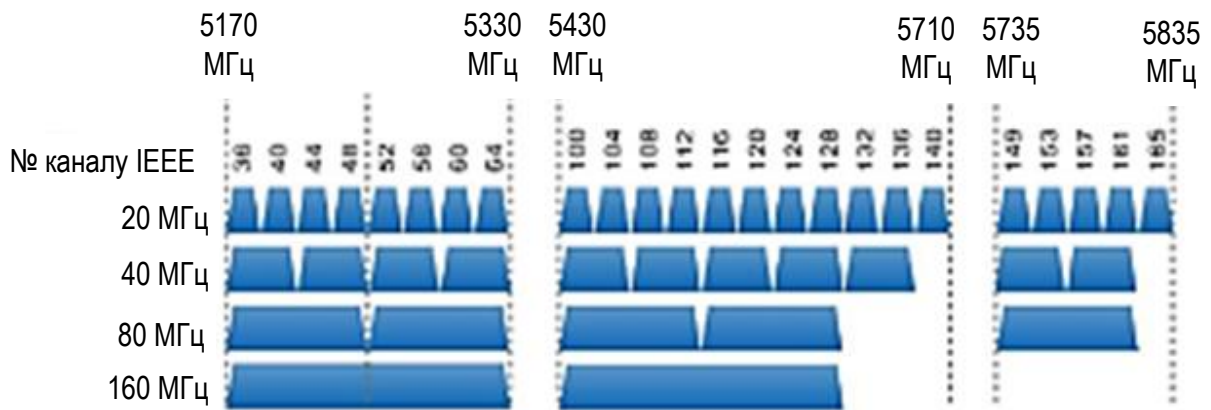


Рисунок 3.4 – Розподіл каналів у сегментах діапазону

У стандарті 802.11ac передбачена обов'язкова агрегація сусідніх каналів: канали шириною 20 МГц об'єднуються попарно для формування каналів 40 МГц, а канали 40 МГц об'єднуються для отримання каналів 80 МГц. Стандарт також допускає агрегацію двох сусідніх або несусідніх каналів 80 МГц в один канал шириною 160 МГц. Загалом підтримується до 24 каналів 20 МГц, до 11 каналів 40 МГц, до 5 каналів 80 МГц і 2 канали 160 МГц (див. рис. 3.4). Приклад використання двох точок доступу на каналах в одній смузі 80 МГц з різними первинними каналами показано на рисунку 3.5.

Можливість роботи з перекриттям каналів (за різних первинних каналів) можлива за таких умов [11]: у стандарті 802.11ac підвищено чутливість до виявлення сигналів на вторинних каналах; механізм обміну RTS/CTS включає індикацію пропускнуої здатності каналів.

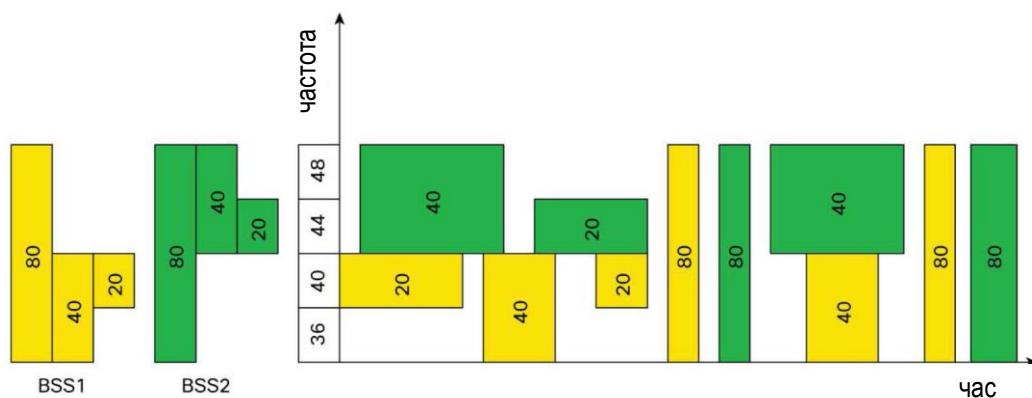


Рисунок 3.5 – Приклад паралельної передачі двох точок доступу

Розглянемо варіанти каналів: два канали по 80 МГц і один канал шириною 160 МГц. Варіант 80+80 МГц має 10 можливих комбінацій (див. рис. 3.4), тоді як для каналу 160 МГц існує лише дві можливості. Це означає, що кількість тайм-слотів для використання каналу 160 МГц значно менша. З іншого боку, пристрої, що підтримують 80+80 МГц, є технічно складнішими через наявність вдвічі більше радіочастотних компонентів. Крім того, такі пристрої можуть працювати в двох режимах: з підтримкою двох просторових потоків на 80 МГц або з одним просторовим потоком, використовуючи канали 80+80 МГц.

Формат преамбули у стандарті 802.11ac є сумісним з пристроями попередніх специфікацій, що дозволяє цим пристроям отримувати інформацію про тривалість передачі від 802.11ac і не передавати її під час роботи.

Особливості реалізації OFDM у цьому стандарті представлені в таблиці 3.4. У 802.11ac кількість OFDM-піднесущих сигналів залежить від використовуваної смуги каналу, де частина піднесущих служить як пілотні. Через преамбулу в кожному каналі 20 МГц, необхідну для сумісності з застарілими пристроями 802.11a/n, виникає проблема пік-фактора. Щоб усунути цей ефект, фаза верхніх піднесущих (див. табл. 3.4) в каналах 20 МГц зміщується (див. табл. 3.5).

Таблиця 3.4 – Розподіл піднесущих

Смуга, МГц	Кількість піднесущих	Піднесущі, на яких передається сигнал	Пілотні піднесущі
20	64	з -28 по -1 і з 1 по 28	$\pm 7, \pm 21,$
40	128	з -58 по -2 і з 2 по 58	$\pm 11, \pm 25, \pm 53,$
80	256	з -122 по -2 і з 2 по 122	$\pm 11, \pm 39, \pm 75, \pm 103$
160	512	з -250 по -130, з 126 по -6, з 6 по 126 і з 130 по 250	$\pm 25, \pm 53, \pm 89, \pm 117,$ $\pm 139, \pm 167, \pm 203, \pm 231$
80+80	2x256	Як і в 80 МГц	Як і в 80 МГц

Таблиця 3.5 – Зміщення фази піднесущих залежно від смуги каналу

Смуга, МГц	Піднесущі зі зміщеною фазою	Величина зміщення
20	Нема	-
40	> 0	90 градусів
80	> -64	180 градусів
160	З -192 по -1 і > 64	180 градусів
80+80	Як і в 80 МГц	Як і в 80 МГц

Схеми модуляції та кодування.

Стандарт 802.11ac підтримує такі модуляційні схеми: BPSK, QPSK, 16КАМ та 64КАМ (як і в 802.11n). Але при смузі каналу 80 МГц та 160 МГц надає можливість роботи і з модуляцією 256КАМ. Ця модуляція не вимагає більшої, ніж 64КАМ, смуги каналу, але потребує незашумленого каналу, тому актуальна на коротких відстанях.

У 802.11ac для абонента встановлені тільки 10 схем модуляції та кодування MCS (див. табл. 3.6). У стандарті 802.11n їх 77.

Таблиця 3.6 – Схеми модуляції та кодування в 802.11ac

MCS	Модуляція	Швидкість кодування
0	BPSK	$\frac{1}{2}$
1	QPSK	$\frac{1}{2}$
2	QPSK	$\frac{3}{4}$
3	16КАМ	$\frac{1}{2}$
4	16КАМ	$\frac{3}{4}$
5	64КАМ	$\frac{2}{3}$
6	64КАМ	$\frac{3}{4}$
7	64КАМ	$\frac{5}{6}$
8	256КАМ	$\frac{3}{4}$
9	256КАМ	$\frac{5}{6}$

Підтримка несиметричних видів модуляції не отримала значного визнання у пристроях 802.11n, тому в стандарті 802.11ac відсутні несиметричні види модуляції. В результаті, у багатопотоковій передачі всі потоки повинні використовувати один і той же тип модуляції.

Технологія MU-MIMO. У попередній специфікації реалізовано режим SU-MIMO, що підвищує швидкість доступу для одного користувача. У стандарті IEEE 802.11ac впроваджено технологію багатокористувацького MU-MIMO (рис. 3.6), яка дозволяє використовувати до 8 просторових потоків, розподілених між 4 точками доступу (при цьому одна точка доступу може підтримувати не більше 4 потоків). Збільшення кількості просторових потоків у порівнянні з 802.11n призвело до подвоєння максимальної пропускної спроможності мережі 802.11ac.

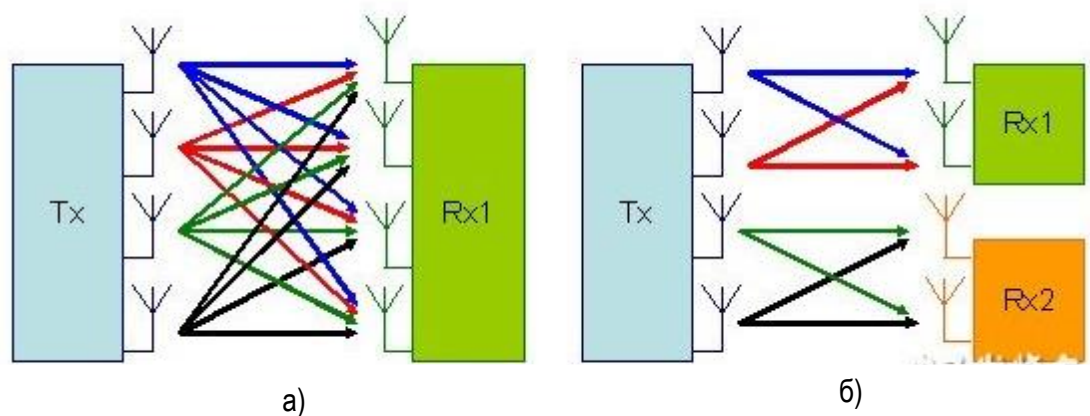


Рисунок 3.6 – Режими SU- і MU-MIMO:

- а) режим SU-MIMO, один користувач, 4 просторових потоки;
- б) режим MU-MIMO, два користувачі, 2 просторових потоки до кожного

Просторові потоки, проходячи через радіоканал, об'єднуються в антені; один з них є корисним, а інші представляють собою завади. Завади від накладання «чужих» потоків усуваються під час обробки на приймальному пристрої.

Ще одна технологія, реалізована в IEEE 802.11ac, - beamforming-MIMO. Це формування променя в MIMO, яке дозволяє змінювати діаграму спрямованості антени для конкретного абонента. Розглянемо роботу точки доступу в режимі формування променя, працюючи з трьома абонентськими станціями (рис. 3.7). Для передачі даних абоненту 1 точка доступу формує потужний промінь (діаграма спрямованості антени) — синя крива, верхня пелюстка. При цьому енергія променя в напрямку абонентів 2 і 3 мінімізується

(на рисунку 3.7 це показано вирізами в синій кривій). Аналогічно формуються сигнали для абонентів 2 і 3 (червона та жовта криві): максимум променя спрямовано на «свого» абонента, а вирізи — на «чужого»

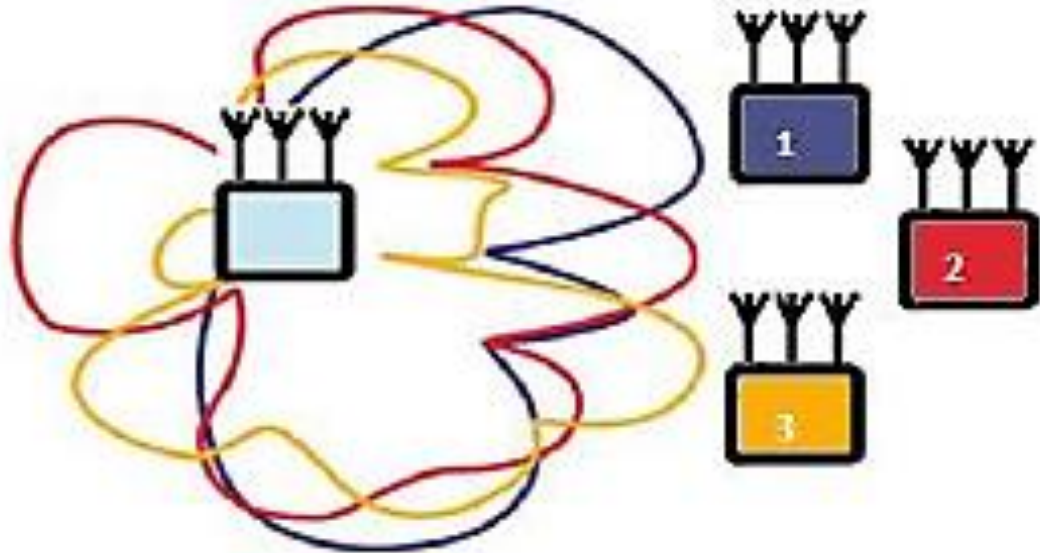


Рисунок 3.7 – Механізм «нульового керування» в MU-MIMO

Кожен з абонентів 1, 2 і 3 отримує сильний сигнал, який лише незначно спотворюється накладанням сигналів від інших абонентів. Цей механізм називається "нульовим управлінням", тобто управлінням положенням нуля діаграми спрямованості антени.

Реалізація механізму «нульового управління» в MU-MIMO є досить складною і вимагає точних даних про характеристики бездротового каналу для кожного абонента. Ця інформація повинна постійно оновлюватися, оскільки характеристики радіоканалу змінюються з часом. Вимірювання та передача цих даних потребують додаткових ресурсів.

Проте MU-MIMO має недолік: час, протягом якого канал залишається зайнятим, визначається найповільнішим абонентом. Новий потік не може бути переданий жодному з абонентів, поки не завершаться всі передачі в групі MU-MIMO. Якщо станції в групі мають значні відмінності в пропускній спроможності (або обсязі переданих даних), ефективність використання бездротового середовища знижується.

Технологія MU-MIMO потребує складної обробки сигналу і, відповідно, дорогого обладнання, включаючи абонентські пристрої. Тому MU-MIMO включено до стандарту 802.11ac як необов'язкова (додаткова) функція.

3.2.3 Стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6)

Нова редакція стандарту бездротових мереж IEEE 802.11ax спрямована на розв'язання важливої задачі — підвищення швидкості обміну даними в умовах великого скупчення користувачів. Ця перевага, разом із підвищеною надійністю передачі даних, робить стандарт ефективним для промислових середовищ. Основні характеристики 802.11ax:

- Працює в діапазонах частот 2.4 та 5 ГГц.
- Підтримує частотні смуги з попередніх стандартів: 20/40/80/160 МГц.
- Підтримує MIMO 8x8, що забезпечує одночасну передачу до 8 просторових потоків.
- Реалізує MU-MIMO в обох напрямках (DL і UL), дозволяючи взаємодію з точкою доступу 802.11ax.
- Підтримує модуляцію 512 та 1024 QAM.
- Включає оновлену схему передачі преамбули та повторної передачі.

Завдяки комплексному застосуванню всіх механізмів, стандарт 802.11ax може теоретично забезпечити швидкість передачі до 10 Гбіт/с. Однією з новинок є застосування технології MU-MIMO також для висхідного потоку — від користувача до точки доступу. Для ефективнішого використання частотного діапазону та боротьби з частотноселективними завадами і інтерференцією, вперше запроваджується множинний доступ з ортогональним частотним розділенням (OFDMA).

Стандарт IEEE 802.11ax особливо підходить для створення бездротових мереж у таких місцях, як стадіони, аеропорти, промислові зони, де багато точок доступу Wi-Fi функціонують на обмеженій території. Це також актуально для офісних та житлових приміщень.

Завдяки технології OFDMA, можливий паралельний обмін даними з багатьма пристроями. Якщо раніше користувачі обмінювались даними через маршрутизатор по черзі, тепер усі підключені пристрої можуть це робити одночасно.

Wi-Fi 6 має покращену ефективність роботи в зонах з великою кількістю подібних мереж, що забезпечується новою функцією BSS Color. Кожен пакет даних підписується цифровим підписом конкретної мережі, що дозволяє роутеру/приймачу відрізнити пакети з сусідніх мереж і ігнорувати їх. Це знижує вплив сусідніх мереж, навіть якщо вони працюють на тому ж каналі.

Функція TWT (Target Wake Time) підвищує енергоефективність у Wi-Fi 6. Кожен пристрій у бездротовій мережі витрачає менше енергії. TWT аналізує активність пристроїв і переводить їх Wi-Fi приймачі в сплячий режим, якщо вони не користуються мережею, що суттєво знижує енергоспоживання.

Удосконалений протокол безпеки WPA3, у поєднанні з системою обміну ключами SAE (Simultaneous Authentication of Equals), забезпечує вищий рівень захисту даних у порівнянні з попередніми версіями Wi-Fi 6.

Розглянемо детальніше зміни у стандарті IEEE 802.11ax, зокрема на фізичному рівні. Параметри фізичного рівня у 802.11ax загалом схожі на 802.11ac. Тут також використовується мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (OFDM) та підтримується робота в частотних каналах шириною 20, 40, 80, 80+80 та 160 МГц.

Збільшення числа піднесущих OFDM до 2048 визначає специфікація. При цьому інтервал між піднесущими скорочено вчетверо при збереженні існуючих смуг пропускання каналу, рисунок 3.8.

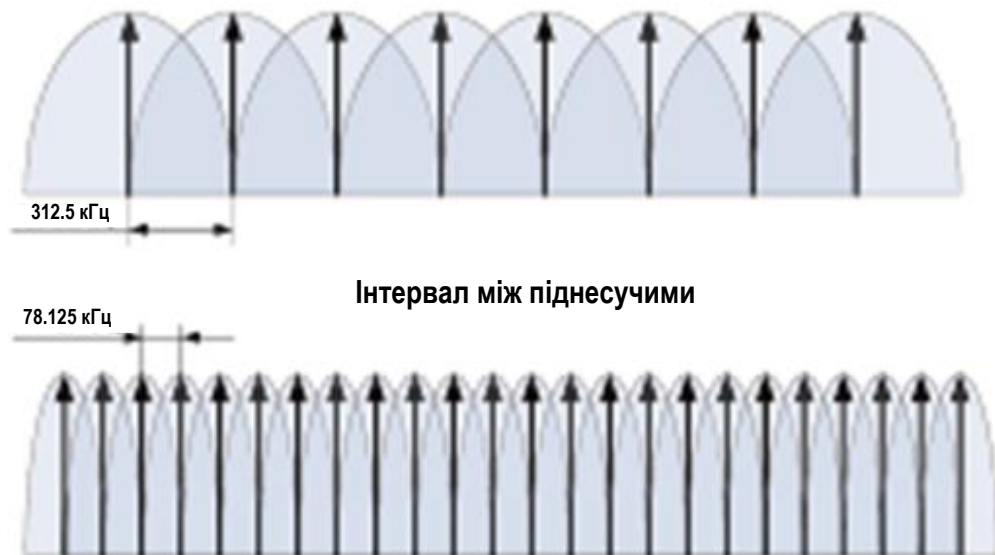


Рисунок 3.8 – Зміна інтервалу між несущими OFDM-сигналу в стандарті 802.11ax

У стандарті 802.11ax застосовується множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA), що забезпечує використання збільшеної кількості піднесуших (див. рис. 3.8). Для покращення ортогональності при використанні OFDMA тривалість OFDM-символів для передачі блоку даних була збільшена вчетверо до 12,8 мкс, у порівнянні з 3,2 мкс у попередніх версіях. Це підвищить надійність багатокористувацької передачі у висхідному каналі, адже за збільшення джиттера через синхронізацію між пристроями різних користувачів, триваліший символ зменшує ймовірність помилок.

Для зменшення міжсимвольної інтерференції у 802.11ax передбачено збільшення захисного інтервалу (Guard Interval, GI) між OFDM-символами, що забезпечує стабільніший зв'язок у приміщеннях і змішаних умовах. В стандарті запропоновано три варіанти тривалості захисного інтервалу: стандартний 0,8 мкс та збільшені 1,6 і 3,2 мкс. Також існує можливість формувати укорочений захисний інтервал тривалістю 0,4 мкс для підвищення швидкості передачі.

У стандарті 802.11ac була вперше реалізована технологія DL MU MIMO, що дозволяє точці доступу одночасно передавати різні дані кільком користувачам, використовуючи просторове мультиплексування. Це базується на

властивостях поширення радіосигналів, що дозволяє значно збільшити загальну пропускну здатність через передачу кількох просторових потоків у різних напрямках замість передачі їх одному користувачу (технологія MIMO). Стандарт 802.11ax розвиває цю концепцію, впроваджуючи просторове мультиплексування у висхідному каналі (UL MU MIMO).

Однією з ключових переваг 802.11ax є чотирикратне збільшення пропускну здатності в умовах щільного розміщення точок доступу, що зумовлено підтримкою Uplink MU-MIMO та MU-OFDMA. Це також дозволяє збільшити кількість одночасно підключених користувачів.

Для підвищення продуктивності мереж Wi-Fi у зонах з щільним розміщенням точок доступу стандарт 802.11ax використовує кілька методів, що підвищують ефективність використання каналних ресурсів у зонах з перекриваючими радіовидимостями.

У мережах Wi-Fi кожен користувач прослуховує середовище, щоб визначити, чи є воно вільним. Якщо преамбула пакета успішно декодована, користувач вважає середовище зайнятим на час передачі пакета. Якщо ж виявлено шум у каналі, що перевищує поріг чутливості на 20 дБм, середовище також вважається зайнятим.

У стандартах Wi-Fi введено механізм NAV — віртуальної зайнятості середовища. NAV можна уявити як лічильник, що зменшується з певного значення до нуля. Якщо значення дорівнює нулю, канал вільний; якщо ні — зайнятий. Значення NAV оновлюється при отриманні кадрів, а заголовок кадру містить поле Duration, що вказує заплановану тривалість передачі.

Зазначені переваги стандарту IEEE 802.11ax реалізуються лише з обладнанням, що його підтримує. Проте навіть пристрої попередніх поколінь, які підтримують стандарти 802.11ac та 802.11n, працюватимуть ефективніше в мережах 802.11ax.

3.2.4 Стандарт 802.11ah (Wi-Fi HaLow)

Цей стандарт виник у відповідь на потребу збільшення робочих відстаней при наднизькому енергоспоживанні, що є актуальним для «Інтернету речей» і специфічних промислових умов. Протокол Wi-Fi HaLow вирішує ці задачі, пропонуючи бездротове рішення з низьким енергоспоживанням, здатне підключати безліч пристроїв на більших відстанях, ніж традиційний Wi-Fi.

Wi-Fi HaLow — це енергоефективна, далекобійна та універсальніша версія Wi-Fi, що працює в неліцензованому спектрі нижче 1 ГГц (конкретні частоти залежать від країни; в Європі використовується діапазон 863-868 МГц). Це ідеальний протокол для бездротових пристроїв на батареях завдяки поєднанню енергоефективності, можливості з'єднання на великих відстанях, низької затримки, швидкості передачі даних для HD-відео, функцій безпеки та підтримки IP.

Ефективні режими управління живленням та сну протоколу IEEE 802.11ah забезпечують тривалу роботу батареї. Вузькосмугові сигнали на частоті близько 1 ГГц можуть передаватися на більші відстані з меншими витратами енергії, що дозволяє передавати більше бітів на одиницю енергії, ніж традиційні протоколи Wi-Fi у діапазонах 2,4 і 5 ГГц.

Wi-Fi HaLow використовує більш вузькі канали порівняно з 20 МГц, що застосовується в традиційному Wi-Fi. Це 20-кратне зменшення ширини каналу веде до збільшення можливостей каналу на 13 дБ. Частоти між 750 і 950 МГц забезпечують додаткові 8-9 дБ бюджету лінії зв'язку через зниження згасання вільного простору. Оптимізовані схеми модуляції та нові методи кодування (MCS10) в протоколі Wi-Fi HaLow надають ще 3 дБ до бюджету каналу.

Загалом, Wi-Fi HaLow підвищує бюджет каналу до 24 дБ у порівнянні з традиційним 2,4 ГГц IEEE 802.11n (Wi-Fi 4). Це перевага ще більш відчутна при порівнянні з Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6/6E, які працюють на частотах 5 і 6 ГГц. Wi-Fi HaLow забезпечує вдесятеро більшу дальність без використання мережевих ретрансляторів.

Крім того, існує загальне правило: нижча частота краще проникає крізь перешкоди та поширюється на більші відстані. Сигнали Wi-Fi HaLow, що працюють на частотах нижче 1 ГГц, легше проходять через різноманітні перешкоди, і менш чутливі до матеріалів стін і конструкцій будівель, ніж сигнали традиційного Wi-Fi на 2,4 і 5 ГГц.

Для корекції відбиття та вирішення проблем багатопробного прийому, Wi-Fi HaLow використовує модуляцію на основі ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (технологію OFDM). Вона ефективно усуває наслідки багатопробного поширення хвиль, що дозволяє більш вільно розміщувати точки доступу (роутери), як всередині приміщень, так і зовні. Графіки пропускної здатності для традиційних Wi-Fi та Wi-Fi HaLow, наведені на рисунку 3.9, демонструють різницю, що пояснюється відмінностями у проникненні сигналу, зумовленими використовуваними частотами.

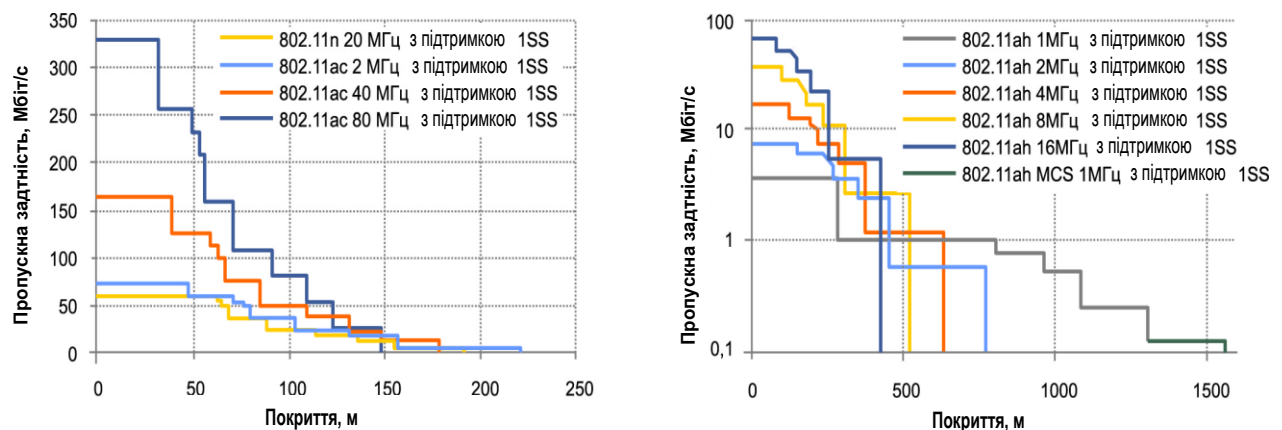


Рисунок 3.9 – Порівняння пропускної здатності 802.11n/ac (ліворуч) і 802.11ah (праворуч) залежно від дальності дії

Щодо масштабування, одна точка доступу Wi-Fi HaLow може підключати до 8191 пристрою, що більше ніж у чотири рази перевищує можливості традиційної точки доступу. Як і в традиційному Wi-Fi, HaLow може автоматично регулювати смугу пропускання залежно від якості сигналу та відстані до точки доступу. Певні значення індексу модуляції та кодування забезпечують пропускну здатність від 150 кбіт/с до 40 Мбіт/с для однопоточних пристроїв з

однією антеною і шириною каналу від 1 до 8 МГц. При використанні додаткового каналу з шириною 16 МГц можлива пропускна здатність до 80 Мбіт/с.

Топологія мережі Wi-Fi HaLow має вигляд «зірки». Як протокол великої дальності, Wi-Fi HaLow підтримує зони обслуговування, що виходять за межі досяжності традиційних Wi-Fi на 2,4 і 5 ГГц, як всередині приміщень, так і на відкритому повітрі. Це робить його ідеальним для великих громадських місць, спортивних арен, торгових і конференц-центрів, де одна точка доступу Wi-Fi HaLow може замінити кілька традиційних, усуваючи пов'язані з ними проблеми. Таким чином, перевантаження мережі, обмеження діапазону та велике енергоспоживання традиційного Wi-Fi перестають бути нездоланими перешкодами. Wi-Fi HaLow вирізняється серед традиційних протоколів 802.11 завдяки своїй розширеній зоні дії, енергоефективності, ємності та універсальності.

3.2.5 Стандарт 802.11s (Wi-Fi Mesh)

Стандарт IEEE 802.11s спрямований насамперед на оптимізацію маршрутів у мережах з безпроводною комірцевою топологією, а також на інтеграцію функцій безпроводних комірцевих мереж (WMN — Wireless Mesh Networks) в існуючі мережі 802.11 на рівні MAC. Основними цілями стандарту 802.11s є:

- створення безпроводної системи розподілу (wireless distribution system) з автоматичним оновленням топології та конфігурації маршрутів;
- формування мереж невеликого розміру (близько 32 вузлів);
- реалізація динамічної маршрутизації з можливістю передачі даних через один або кілька маршрутів (пакети broadcast та unicast);
- забезпечення подальшої розширюваності мережі;
- забезпечення сумісності з протоколами вищого рівня.

Структура мережі WMN з урахуванням стандарту 802.11s та технології mesh-мереж детально розглянута в попередньому розділі.

3.3 Висновки до розділу

Практика останніх років експлуатації Wi-Fi у промисловості орієнтує на переважне використання для промислових середовищ стандартів, які забезпечують надійне з'єднання, високу продуктивність та стійкість до завад. У роботі сформульовані основні технологічні вимоги щодо адаптації Wi-Fi до промислових умов. До них віднесені: завадостійкі види модуляції, технологія MU-MIMO, технологія Beamforming, комірчаста структура мережі, протоколи безпеки, протоколи автоматичного налаштування та керування. З урахуванням цього надана прикладна оцінка п'яти стандартів Wi-Fi, які рекомендовано застосовувати у промислових середовищах.

Важливим аспектом у технологіях Wi-Fi, завдяки чому реалізується їх адаптація до промислових умов, є завадостійкі види модуляції. В усіх розглянутих стандартах використано технологію ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням OFDM (OFDMA) та різної позиційності модуляцію QAM на піднесущих. Це відіграє важливу роль у забезпеченні надійної роботи Wi-Fi у промислових умовах.

У рамках стандарту 802.11s проаналізована концепція безпроводної комірчастої мережі WMN. Показано, що вона дозволяє на практиці реалізувати переваги комірчастої топології - висока надійність, гнучкість, розширюваність, висока пропускна здатність та сумісність з чинними стандартами WLAN 802.11.

Наведено рекомендації щодо організації мереж передачі даних на основі технології Wi-Fi для промислових середовищ.

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи
виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	55	55	55
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		55,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти,

закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	75	75	75
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	75,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [17]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 55,0$, $k_{теор} = 75,0$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 55,0 + 0,4 \cdot 75,00 = 63,00 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах», даний рівень становить 63,00 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп,

науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [17]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 18500,00 \cdot 11 / 22 = 8500,03 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник дослідження	18500,00	772,73	11	8500,03
Інженер-дослідник телекомунікаційних систем	17600,00	750,00	28	21000,00
Науковий співробітник за напрямом досліджень функціонування мереж	17700,00	681,82	4	2727,28
Технік	9000,00	409,09	11	4500,00
Всього				36727,31

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [17];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,50 \cdot 1,15 / (22 \cdot 8) = 78,41 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 78,41 \cdot 10,00 = 784,09 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
Встановлення елементів промислової мережі	10,00	4	1,50	78,41	784,09
Встановлення програмного забезпечення	5,50	5	1,70	88,86	488,75
Підготовка робочого місця інженера-дослідника	7,85	2	1,10	57,50	451,38
Контроль проведення цифрового експерименту	12,00	3	1,35	70,57	846,82
Всього					2571,03

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (36727,31 + 2571,03) \cdot 11 / 100\% = 4322,82 \text{ грн.}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_n}{100\%} \quad (4.6)$$

де H_n – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (36727,31 + 2571,03 + 4322,82) \cdot 22 / 100\% = 9596,66 \text{ грн.}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (4.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$C_{\epsilon j}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 4,0 \cdot 216,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 967,68 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4, Crystal Pro80, клас С, 500 л, UPM	216,00	4,0	0	0	967,68
Папір офісний А3, Maestro Standart+, клас В, 80 г/м2, 500 л, Mondi	468,00	1,0	0	0	524,16
Папір офісний Офіс Центр А5 80г/м2 500 аркушів клас С	129,90	3,0	0	0	436,46
Органайзер для канцелярського начиння	210,00	2,0	0	0	470,40
ДИСК CD-R VERBATIM 700MB 80MIN 52X BULK 50	540,00	1,0	0	0	604,80
USB флеш накопичувач 32 ГБ	169,00	1,0	0	0	189,28
Кабель Ethernet категорії 6, 1000 Мбіт/с високошвидкісний гігабітний	40,00	10,0	0	0	448,00
LAN-кабель з роз'ємами RJ45	32,00	10,0	0	0	358,40
Всього					3999,18

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» відсутні.

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.8)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 1189,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 1319,79 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.7 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Бездротовий маршрутизатор Netis N2	1	1189,00	1319,79
Всього			1319,79

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних

для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k \Pi_{npz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де Π_{npz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 355,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 394,05 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць	1	355,00	394,05
Пакет Visual System Simulator	1	4920,00	5461,20
Пакет Microwave Office	1	3850,00	4273,50
Пакет MATLAB SIMULINK	1	3180,00	3529,80
Всього			13658,55

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{\Pi_{об}}{T_{\epsilon}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.10)$$

де $\Pi_{об}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_g – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (42999,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1791,63 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.9 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Програмно-аналітичний комплекс проектування на базі Ноутбука HP Victus 16-e0105nw (4Y102EA)	42999,00	2	1	1791,63
Обладнання виводу інформації Лазерний принтер HP LaserJet Pro M102w c Wi-Fi (G3Q35A)	7465,00	4	1	155,52
Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване	7690,00	5	1	128,17
Офісна оргтехніка	8960,00	5	1	149,33
Приміщення лабораторії досліджень	600000,00	20	1	2500,00
ОС Windows 11	8450,00	2	1	352,08
Пакет Microsoft Office 2019	7950,00	2	1	331,25
Всього				5407,98

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.11)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,40 \cdot 170,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 746,64 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Програмно-аналітичний комплекс проектування на базі Ноутбука HP Victus 16-e0105nw (4Y102EA)	0,40	170,0	746,64
Обладнання виводу інформації Лазерний принтер HP LaserJet Pro M102w c Wi-Fi (G3Q35A)	0,25	5,0	13,73
Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване	0,10	170,0	186,66
Офісна оргтехніка	0,50	1,5	8,24
Всього			955,26

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.12)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (36727,31 + 2571,03) \cdot 20 / 100\% = 7859,67 \text{ грн.}$$

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_s = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{is}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де H_{is} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{is} = 50\%$.

$$I_s = (36727,31 + 2571,03) \cdot 50 / 100\% = 19649,17 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків;

витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (36727,31 + 2571,03) \cdot 100 / 100\% = 39298,34 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = З_o + З_p + З_{доп} + З_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.15)$$

$$B_{заг} = 36727,31 + 2571,03 + 4322,82 + 9596,66 + 3999,18 + 0,00 + 1319,79 + 13658,55 + 5407,98 + 955,26 + 7859,67 + 0,00 + 19649,17 + 39298,34 = 145365,77 \text{ грн.}$$

Загальні витрати $ЗВ$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.16)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$ЗВ = 145365,77 / 0,95 = 153016,60 \text{ грн.}$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.17)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I=3$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n=0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n=1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n=2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n=3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n=3$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C=2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R=4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R=3$; якщо нижче відомих результатів, то $R=1$. Прийmemo $R=4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B=153016,60$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t=0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [17].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 3^3 \cdot 2 \cdot 4 / 153,0 \cdot 0,08 = 16,94.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» складають 153016,60 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

Wi-Fi мережі в промислових умовах стикаються з рядом проблем і викликів, які можуть серйозно ускладнити їхню функціональність і надійність. До них відносяться: електромагнітні завади, висока щільність пристроїв, фізичні перешкоди, вимоги до надійності та безпеки, високі вимоги до продуктивності, складність управління та моніторингу. Ці проблеми вимагають спеціальних рішень і технологій для адаптації Wi-Fi мереж до промислових умов, таких як використання завадостійких модуляцій, розгортання Mesh-мереж, впровадження засобів управління трафіком і безпекою, а також оптимізація продуктивності мережі.

Проаналізовані основні чинники, які впливають на ефективність бездротових мереж Wi-Fi в промислових умовах, і надані рекомендації для забезпечення їх нормальної роботи. Для забезпечення сумісності з іншими Wi-Fi пристроями (точки доступу, бездротові камери тощо) рекомендується звернути увагу на вибір частотного каналу роутера. Може бути доцільним зниження потужності сигналу Wi-Fi до 50-75%.

Для частотного діапазону 2,4 ГГц проаналізовані втрати ефективності сигналу Wi-Fi при проходженні через різні середовища. Визначено фактори, які впливають на швидкість передачі даних Wi-Fi мережі, такі як поширення у середовищі загального користування, інтерференція, доплерівський ефект і частотно-залежне згасання.

Результати аналізу умов роботи Wi-Fi в промислових середовищах свідчать про те, що такі системи мають бути оснащені технологіями, які забезпечують їх надійність та ефективність. Найсучасніші версії стандартів 802.11, безумовно, включають ці передові технології. Проведено аналіз основних технологій Wi-Fi-систем і продемонстровано їхню ефективність у зазначених умовах.

Використання завадостійких модуляцій, таких як OFDM та OFDMA, підвищує стійкість до електромагнітних завад і зменшує ймовірність помилок.

Ця технологія є особливо ефективною для боротьби з наслідками багатопроменевого поширення хвиль, зокрема міжсимвольною інтерференцією. Технологія MU-MIMO дозволяє одночасну передачу даних кільком користувачам в різних напрямках, що підвищує продуктивність і ефективність мережі в умовах високого навантаження. Мережі Mesh забезпечують гнучке та надійне рішення для покриття великих промислових об'єктів, створюючи розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла.

Окрім того, представлені алгоритми роботи та проаналізовані особливості функціонування систем Wi-Fi з використанням технологій BSS Coloring, TWT і beamforming. Дослідження показало, що їх застосування сприяє підвищенню надійності передачі даних, зменшенню затримок і значній економії енергії. Зокрема, beamforming дозволяє спрямовувати Wi-Fi сигнал у певному напрямку, покращуючи дальність та стабільність з'єднання, особливо в умовах високого рівня завад або в обмежених просторах.

Практика останніх років експлуатації Wi-Fi у промисловості орієнтує на переважне використання для промислових середовищ стандартів, які забезпечують надійне з'єднання, високу продуктивність та стійкість до завад. З урахуванням цього надана прикладна оцінка п'яти стандартів Wi-Fi, які рекомендовано застосовувати у промислових середовищах.

Виконана економічна частина, яка підтверджує ефективність виконаних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт зі спеціальності “Телекомунікації та радіотехніка” (освітньо-професійна програма “Телекомунікації”) для студентів денної та заочної форм навчання / Уклад. Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 50с.
2. Бортник Г. Г. Системи передавання в електрозв’язку. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 138 с.
3. Бойко Ю.М. Концептуальні особливості реалізації безпроводних сенсорних мереж / Ю.М. Бойко, В.В. Мішан // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – Хмельницький . – 2010. – №2. – С. 94 -98.
4. Солодовник В.І. Метод адаптивної об’єднаної прийомо–передавальної просторової модуляції для високошвидкісних систем безпроводового зв’язку / Солодовник В.І. // Збірник наукових праць ВІТІ, 2018. – № 1 – С. 126 – 140.
5. Солодовник В.І. Алгоритм адаптивної модуляції та просторового мультиплексування у багатоантенних системах безпроводового зв’язку / Солодовник В.І. // Збірник наукових праць ВІТІ, 2018. – № 3 – С. 103 – 111.
6. Бабак В.П. Обробка сигналів у радіоканалах цифрових систем передавання інформації: Навч. посібник [Текст] / В.П. Бабак, Т.М. Наритник, Ю.В. Куц, В.Я. Казимиренко. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 476 с.
7. Головін Ю.О. Основи радіозв’язку з рухомими об’єктами : навч. посіб. Київ : ІСЗЗІ НТУУ КПІ, 2016. 322 с.
8. Дружинін В.А. Динамічні моделі просторово-часової обробки сигналів від джерел радіовипромінювання в умовах рознесеного прийому локаційної інформації / В.А. Дружинін, Ю.М. Бойко, О.І. Єрмоменко, В.І. Корсун. – Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2020 – с. 12-25 Conference 28 June 2021.
9. Радіомережі: Багатоантенні системи [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В.А. Головін,

О.О. Шпилька ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,36 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 169 с.

10. Науменко М.І. Аналіз методів просторової модуляції для високошвидкісних багатоантенних систем безпроводового зв'язку / М.І. Науменко, В.І. Солодовник // ВІТІ № 4 – 2018. – 73–83с.

11. Системи передавання широкосмуговими сигналами: [навч. посібник] / В. О. Балашов, П. П. Воробієнко, Л. М. Ляховецький, В. В. Педяш. – Одеса: Вид. центр ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. – 336 с.

12. IEEE 802.11s Multihop MAC: A Tutorial Ricardo C. Carrano, Luiz C.S. Magalhaes, Debora C. Muchaluat Saade and Celio V.N. Albuquerque, IEEE Communications Surveys and Tutorials Volume 13, Number 1, First Quarter 2011.

13. IEEE 802.11s: The WLAN Mesh Standard Guido Hiertz, Dee Denteneer, Sebastian Max, Rakesh Taori, Javier Cardona, Lars Berlemann, Bernhard Walke, IEEE Wireless Communications, — vol. 17, № 1, — pp. 104—111, — 2010.

14. Бойко М.П. Системи стільникового зв'язку: Конспект лекцій. – Одеса: ОНАЗ, 2004. – 76с.

15. Поширення земних радіохвиль та мобільний зв'язок [текст] / Л. М. Логачова, Т. І. Бугрова / Навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 236 с.

16. В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. Телекомунікаційні мережі. Київ, Техніка, 2001р. – 526 с.

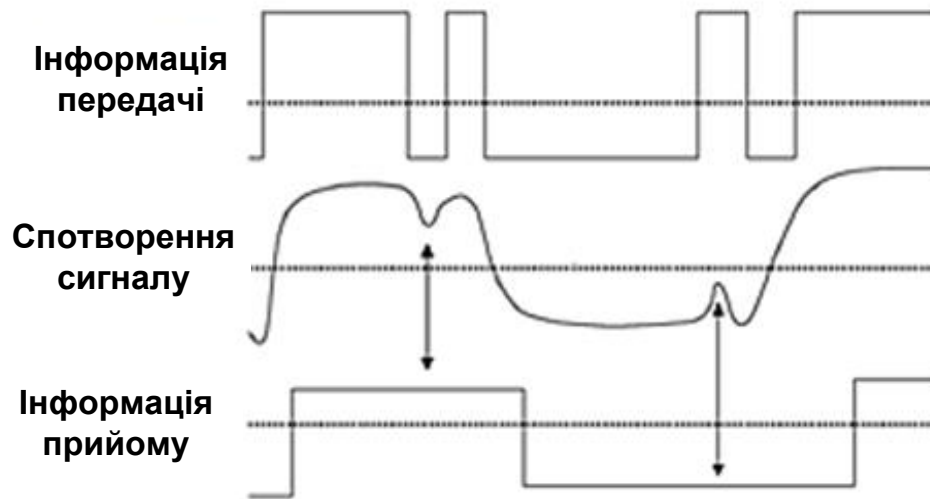
17. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Додаток А
(обов'язковий)

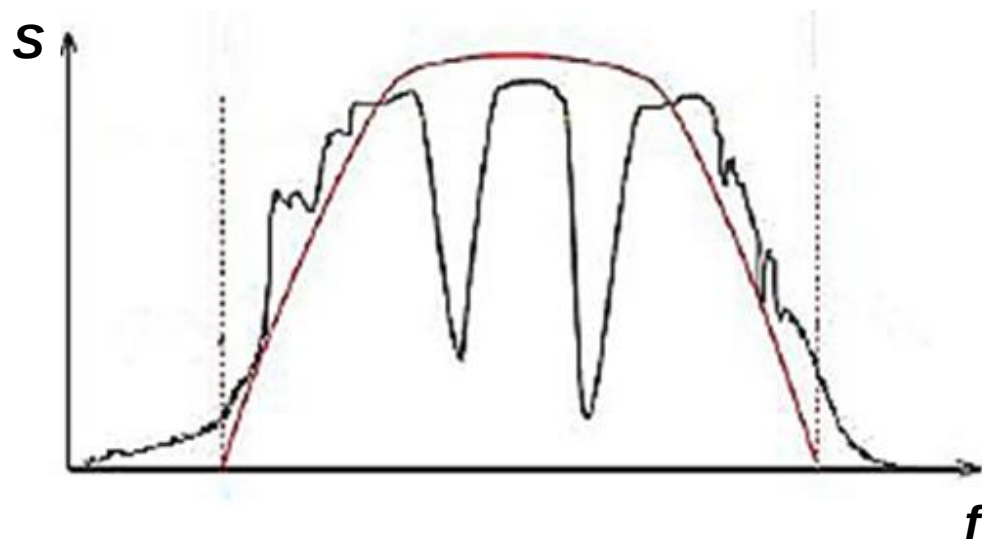
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПОБУДОВА МЕРЕЖІ Wi-Fi В ПРОМИСЛОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ
назва магістерської кваліфікаційної роботи

Втрати ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження
через різні середовища

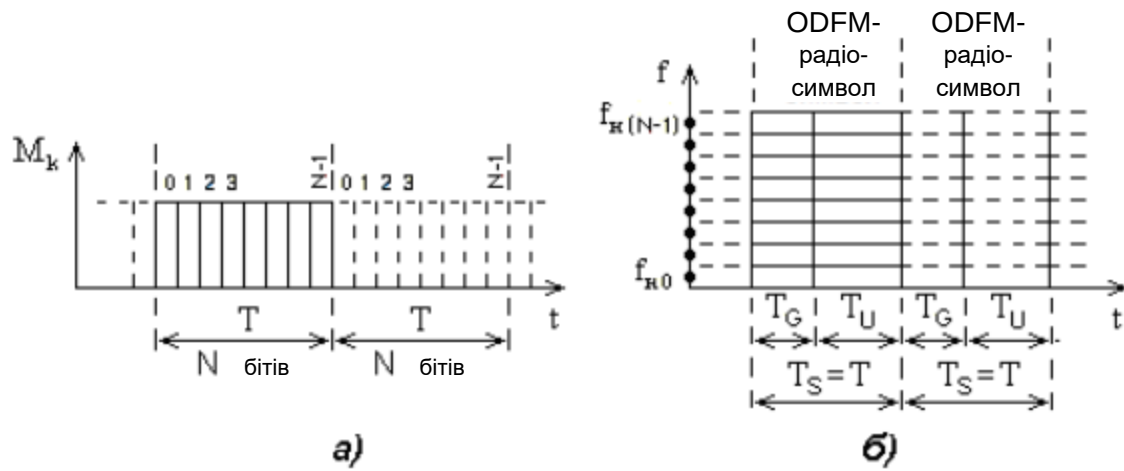
Перешкода	Додаткові втрати, дБ	Ефективна відстань, %
Відкритий простір	0	100
Вікно без тонування (відсутнє металізоване покриття)	3	70
Вікно з тонуванням (металізоване покриття)	5-8	50
Дерев'яна стіна	10	30
Міжкімнатна стіна (15,2 см)	15-20	15
Несуча стіна (30,5 см)	20-25	10
Бетонна підлога/стеля	15-25	10-15
Монолітне залізобетонне перекриття	20-25	10



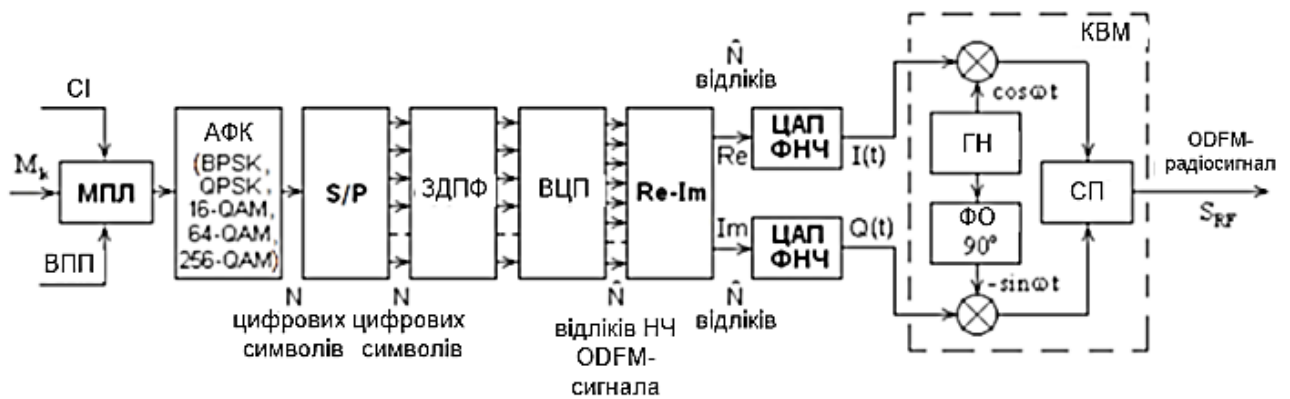
Спотворення сигналу під впливом міжсимвольної інтерференції



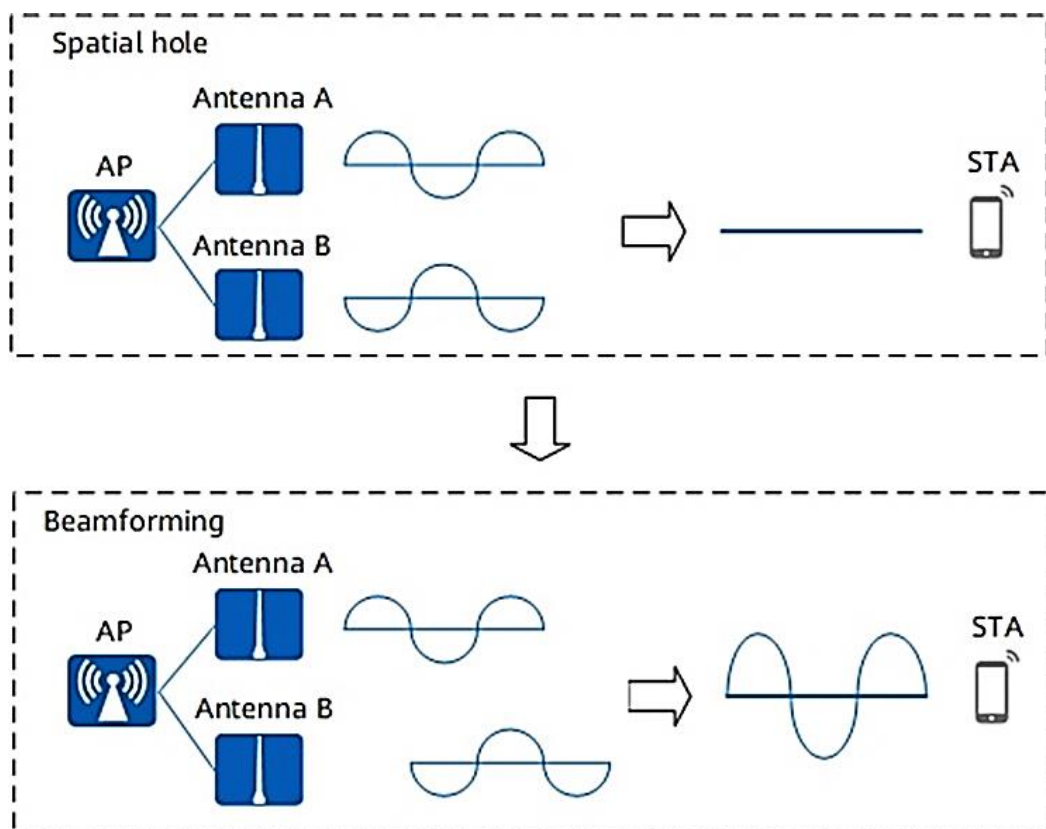
Спотворення спектру сигналу при відбитті від перешкод



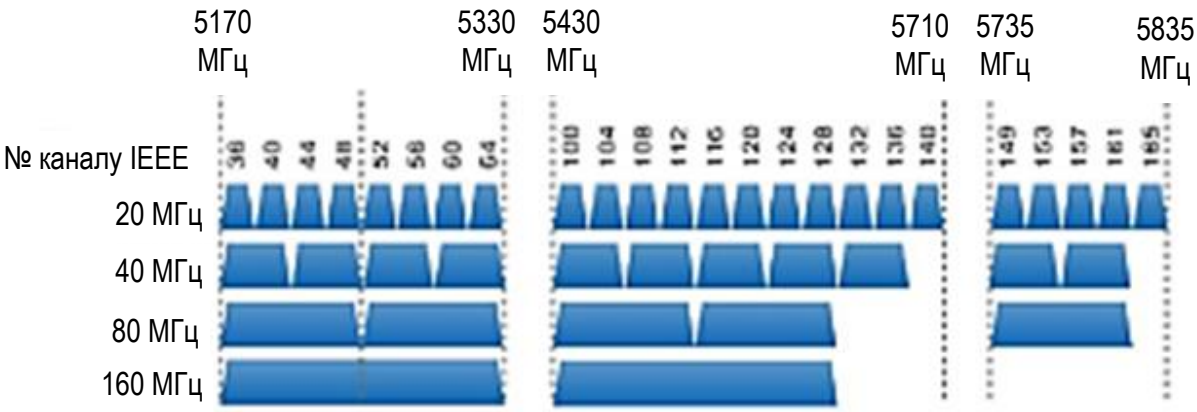
До пояснення принципу формування OFDM-радіосимволів



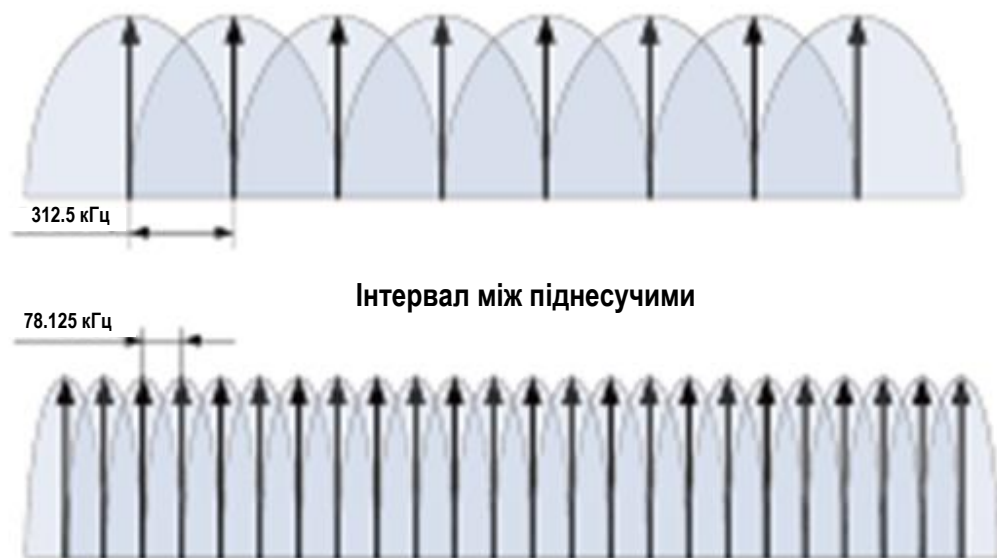
Структурна схема формувача OFDM-радіосигналу з блоком ЗДПФ



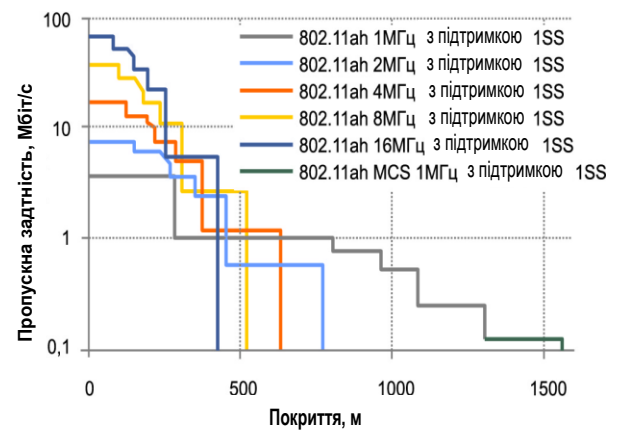
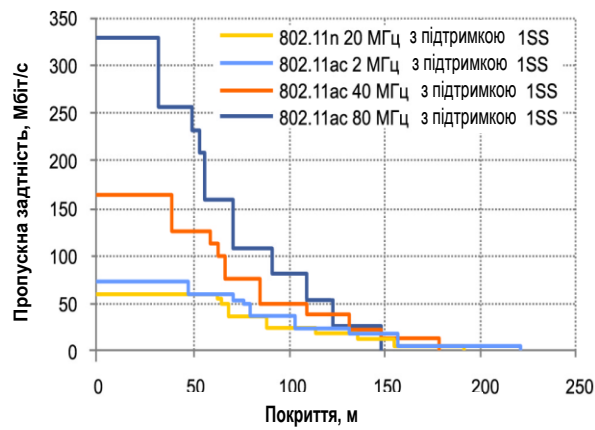
Пояснення технології beamforming



Розподіл каналів у сегментах діапазону



Зміна інтервалу між несущими OFDM-сигналу
в стандарті 802.11ax



Порівняння пропускної здатності 802.11n/ac (ліворуч)
і 802.11ah (праворуч) залежно від дальності дії

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Побудова мережі Wi-Fi в промислових середовищах

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Барась С. Т., к.т.н., професор

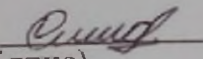
Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	84
Загальна схожість	16

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

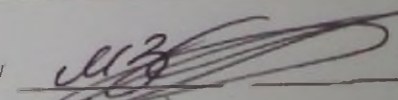
Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор 
(підпис)

Онищук Д. О.
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

Експерт _____
(за потреби) (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)