

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

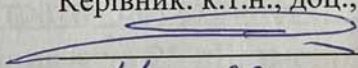
Бакалаврська дипломна робота на тему:

АДАПТАЦІЯ АЛГОРИТМУ РОБОТИ Wi-Fi В ПРОМИСЛОВИХ
СЕРЕДОВИЩАХ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-206
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

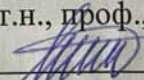
 Паламаренко Ю.В.

Керівник: к.т.н., доц., професор каф. ІКСТ

 Барась С. Т.

« 11 » 06 2024 р.

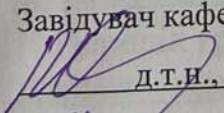
Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС

 Семенов А.О.

« 11 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

«06» 05 2024 року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Паламаренку Юрію Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Адаптація алгоритму роботи 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 ВНТУ від «11» березня 2024 року № 80

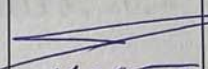
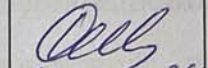
2. Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: втрати ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища – 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, ah, s, агрегація каналів 20, 40, 80 та 160 МГц, технології OFDM та MIMO.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, фонові проблеми для Wi-Fi у промислових середовищах, реалізація I/Q-методу для квадратурної амплітудної модуляції, технології та протоколи адаптації Wi-Fi до промислових умов роботи, розрахунки основних технічних показників фізичного рівня, охорона праці.

5. Перелік графічного 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; спрощена структурна схема модулятора QAM-16; розподіл каналів у сегментах діапазону, ілюстрація режимів SU- і MU-MIMO; зміна інтервалу між несущими OFDM-сигналу в стандарті 802.11ah; порівняння пропускної здатності 802.11n/ac і 802.11ah; архітектура WMN-мережі на базі 802.11s; схема промислового Wi-Fi.

6. Консультанти розділів роботи

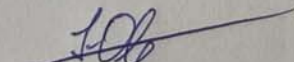
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 06.05.2024	 11.06.2024
Охорона праці	Дембурка С. В. проф. каф. БЖД ПБ	 06.05.2024	 11.06.2024

7. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

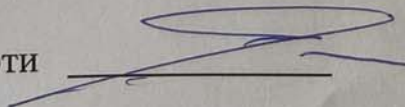
№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської дипломної роботи (БДР)	06.05.2024р.	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	20.05.2024р.	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	31.05.2024р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	04.06.2024р.	
5	Нормоконтроль БДР	05.06.2024р.	
6	Попередній захист БДР	06.06.2024р.	
7	Рецензування БДР	07.06.2024р.	
8	Захист БДР	12.06.2024р.	

Студент


(підпис)

Паламаренко Ю. В.

Керівник роботи



Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

Адаптація алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах. Бакалаврська дипломна робота / Ю. В. Паламаренко – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 114с., 20 рис., 15 табл., 25 дж. – українською мовою.

Мета роботи-удосконалення архітектури промислових Wi-Fi, покращення їх продуктивності, захищеності та надійності у рамках адаптації до промислових середовищ. Структуровані джерела завад для мереж Wi-Fi при їх використанні у промислових середовищах, показані шляхи зменшення впливу завад. Визначені фактори, які впливають на швидкість передачі інформації у промислових Wi-Fi, запропоновані методи збільшення швидкості передачі інформації каналів доступу. Проаналізовані технологічні вимоги щодо адаптації Wi-Fi до промислових умов, дана прикладна оцінка орієнтованої на такі умови групи стандартів. Виконана оцінка ефективності та завадостійкості основної модуляційної схеми рекомендованих стандартів, проведено розрахунки радіоканалу передачі даних.

Виконано розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

ABSTRACT

Adaptation of Wi-Fi algorithm in industrial environments. Bachelor thesis / Yu. V. Palamarenko – Vinnytsia: VNTU, 2024. – 114 p., 20 fig., 15 tabl., 25 s. - In ukrainian.

The purpose of the work is to improve the architecture of industrial Wi-Fi, improve their performance, security and reliability within the framework of adaptation to industrial environments. Structured sources of interference for Wi-Fi networks when they are used in industrial environments, ways to reduce the impact of interference are shown. The factors that affect the speed of information transmission in industrial Wi-Fi are determined, methods of increasing the speed of information transmission of access channels are proposed. The technological requirements for Wi-Fi adaptation to industrial conditions are analyzed, and an applied assessment of a group of standards oriented to such conditions is given. The evaluation of the efficiency and immunity of the main modulation scheme of the recommended standards was carried out, the calculations of the radio data transmission channel were carried out.

The section on labor protection and life safety has been completed.

ЗМІСТ

	ВСТУП	4
1	ФОНОВІ ПРОБЛЕМИ ДЛЯ Wi-Fi У ПРОМИСЛОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ	8
1.1	Джерела завад для мереж Wi-Fi та шляхи зменшення їх впливу	11
1.2	Фактори, що визначають швидкість передачі інформації у мережах Wi-Fi	16
1.2.1	Багатопроменева інтерференція	17
1.2.2	Частотно-залежне згасання	18
1.2.3	Доплерівський ефект	19
1.3	Методи збільшення швидкості передачі інформації каналу доступу ..	20
1.4	Реалізація I/Q методу для квадратурної амплітудної модуляції	22
1.5	Висновки до розділу	26
2	ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРОТОКОЛИ АДАПТАЦІЇ Wi-Fi ДО ПРОМИСЛОВИХ УМОВ РОБОТИ.....	28
2.1	Технологічні вимоги щодо адаптації Wi-Fi до промислових умов	29
2.2	Прикладна оцінка стандартів Wi-Fi	31
2.2.1	Стандарт 802.11n (Wi-Fi 4)	31
2.2.2	Стандарт 802.11ac (Wi-Fi 5)	37
2.2.3	Стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6)	44
2.2.4	Стандарт 802.11ah (Wi-Fi HaLow)	48
2.2.5	Стандарт 802.11s (Wi-Fi Mesh)	53
2.3	Промисловий Wi-Fi: раціональні рішення для організації мереж передачі даних	60
2.4	Висновки до розділу	64
3	ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ПОКАЗНИКИ ФІЗИЧНОГО РІВНЯ	67
3.1	Ефективність та завадостійкість QAM-N модуляції	67
3.1.1	Спектральна ефективність	68
3.1.2	Енергетична ефективність	70
3.1.3	Завадостійкість квадратурної амплітудної модуляції	72

	3
3.2 Розрахунки радіоканалу передачі даних	77
3.2.1 Розрахунок згасання в антенно-фідерному тракті	77
3.2.2 Розрахунок ефективної ізотропно-випроміненої потужності	77
3.2.3 Розрахунок сумарного підсилення радіосистеми	78
3.2.4 Розрахунок дальності роботи безпроводного каналу зв'язку	79
3.2.5 Розрахунок сумарних втрат радіосистеми	80
3.2.6 Розрахунок енергетичного запасу радіоканалу.....	81
3.3 Висновки до розділу	81
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	83
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	84
4.1.1 Обладнання робочого місця	84
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	86
4.2.1 Мікроклімат	86
4.2.2 Склад повітря робочої зони	87
4.2.3 Виробниче освітлення.....	88
4.2.4 Виробничий шум.....	90
4.2.5 Виробничі випромінювання.....	91
4.3 Пожежна безпека.....	92
4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі.....	92
4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту	93
4.4 Висновки до розділу	94
ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	98
Додаток А (обов'язковий) - Ілюстративний матеріал	101
Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	109

ВСТУП

Актуальність теми. Використання безпроводної мережі на підприємствах - це не привілея у наш час, а більшою мірою потреба. Вона пов'язана з активним впровадженням автоматизації та інноваційних технологій не лише у суспільну сферу життя, а й роботу підприємств, компаній та фабрик. Розгортання мережі Wi-Fi на підприємстві залежить від бюджету організації та її потреб [1-4].

Однак, у будь-якому випадку важливо розуміти, що не існує межі розвитку і те, що раніше вважалося високотехнологічним чи інноваційним, тепер стає невід'ємною частиною нашого життя. Повною мірою це стосується і технології Wi-Fi та її впровадження на території промислових підприємств, фірм, організацій тощо. Питання лише в тому, наскільки комфортно і продуктивно працювала організація весь час, поки інші вже на досить великий крок просунулися до прогресу. А як швидко цей крок зробити, вирішувати, звісно, керівникам.

Бездротові мережі надають величезний обсяг статистичної інформації про роботу їх самих та їх клієнтів. Але щоб така інформація мала сенс, необхідні аналітичні засоби, які дають можливість зрозуміти, як працюють програми, хто, як і звідки підключається до мережі, яка якість з'єднання забезпечує мережу. Комплексний підхід дозволяє ІТ-фахівцям бачити кожную точку доступу окремо та загальну картину цілком, а також у дистанційному режимі визначати та усувати несправності в мережі.

Сьогодні компанії активно розгортають свої корпоративні мережі. При цьому орієнтація відбувається на такі стандарти Wi-Fi: 802.11n, 802.11ac, 802.11ax, 802.11ah, 802.11s. Технічні характеристики цих стандартів дозволяють:

- бути присутнім по всій території підприємства (там, де передбачається їх наявність);

- складати конкуренцію провідній передачі інформації завдяки сучасним технологіям, що підвищують швидкість трафіку в безпроводній 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.

Бездротові мережі затребувані скрізь: на виробничих і промислових підприємствах, в офісних центрах, в компаніях з оптової та роздрібною торгівлі, готельних комплексах, транспортних підприємствах тощо. 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 один з одним для вирішення поставлених завдань, і Wi-Fi не є винятком. Як уже було сказано, для забезпечення зручностей та переваг обов'язково потрібен комплексний підхід до побудови по-справжньому корпоративної бездротової мережі [3, 4].

Безпроводна мережа повинна бути доступною, надійною, масштабованою, безпечною та продуктивною.

Аналіз останніх досліджень. У деяких ситуаціях сучасного бізнесу кабелі, які вважаються надійним інструментом створення корпоративної мережі, не витримують конкуренції перед бездротовими промисловими мережами Wi-Fi. Якщо Wi-Fi мережа впроваджена грамотно, вона має велику кількість переваг перед провідними мережами. Головною з цих переваг є мобільність робочих місць [3].

Останні дослідження технологій та протоколів, що використовуються для адаптації Wi-Fi до промислових умов, є важливим етапом визначення оптимальних рішень для промислових мереж. До технологій та протоколів, які

часто застосовуються для адаптації Wi-Fi до промислових умов, відносять [2-5]:

Завадостійкі модуляції - їх використання (OFDM та OFDMA) дозволяє покращити стійкість до електромагнітних завад та зменшити ймовірність помилок.

Багатокористувацькі технології (MU-MIMO) – дозволяє реалізувати одночасну передачу даних кільком користувачам на різних напрямках, що підвищує продуктивність і ефективність мережі в умовах високого завантаження.

Beamforming - ця технологія 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 - надають більш гнучке та надійне рішення для покриття великих промислових об'єктів. Ця технологія дозволяє створювати розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла.

Протоколи керування трафіком – застосування цих протоколів, таких як QoS (Quality of Service) та TSPEC (Traffic Specification), дозволяє забезпечити пріоритетну передачу даних з високими вимогами до продуктивності, такими як потокове відео або голосовий зв'язок.

Протоколи безпеки - використання протоколів безпеки, таких як WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3) та 802.1X, забезпечує захист від несанкціонованого доступу та захист даних у промислових мережах.

Протоколи автоматичного налаштування та керування – застосування протоколів, таких як CAPWAP (Control and Provisioning of Wireless Access Points), дозволяє спростити розгортання та керування великими промисловими Wi-Fi мережами.

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є удосконалення архітектури промислових Wi-Fi, покращення їх продуктивності, захищеності та надійності у рамках адаптації до промислових середовищ.

Задачами бакалаврської дипломної роботи є:

- аналіз фонових проблем для Wi-Fi у промислових середовищах;

- аналіз методів збільшення швидкості передачі інформації каналу доступу;
- аналіз технологічних вимог щодо адаптації Wi-Fi до промислових умов;
- прикладна оцінка стандартів Wi-Fi;
- оцінка ефективності та завадостійкості модуляційної схеми;
- розрахунки радіоканалу передачі даних;
- розробка заходів з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Об'єкт дослідження це процеси формування, передачі, прийому та обробки радіосигналів в умовах з ускладненою заводовою обстановкою.

Предмет дослідження є технології та алгоритми, які забезпечують високопродуктивну, надійну та захищену роботу Wi-Fi.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає у використанні її результатів для забезпечення високих показників телекомунікаційних пристроїв та в навчальному процесі в дисциплінах «Технології безпроводних мереж зв'язку» і «Сигнали та широкосмугові технології в телекомунікаціях».

1 ФОНОВІ ПРОБЛЕМИ ДЛЯ Wi-Fi У ПРОМИСЛОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Робота Wi-Fi на підприємствах має свої особливості через велику кількість користувачів, високі вимоги до надійності та безпеки мережі. Охарактеризуємо їх у загальних рисах [1, 2].

1. Масштаб мережі. Підприємства зазвичай мають велику площу та високу кількість користувачів. Тому потрібна масштабована Wi-Fi інфраструктура, здатна забезпечити покриття всього приміщення та підтримувати стабільне з'єднання для всіх пристроїв.

2. Управління трафіком. На підприємстві може бути багато різних типів трафіку, включаючи голосовий та відеозв'язок, потокове відео, хмарні програми тощо. Управління пріоритетами трафіку та його розподіл є важливими аспектами для забезпечення продуктивності мережі.

3. Безпека. Підприємства наражаються на різні загрози безпеці, тому Wi-Fi мережі повинні бути захищені від несанкціонованого доступу та шкідливих атак. Захист включає такі прийоми як використання шифрування, автентифікацію користувачів, брандмауери, системи виявлення вторгнень та інші заходи безпеки.

4. Управління та моніторинг. Адміністраторам мережі необхідні інструменти для управління та моніторингу Wi-Fi інфраструктури. Сюди входить можливість налаштування і контролю доступу користувачів, моніторингу продуктивності мережі, виявлення і усунення несправностей тощо.

5. Гостьові мережі. Часто на підприємствах потрібно надати доступ до Wi-Fi для гостей. При цьому важливо розмежувати доступ гостей від внутрішньої корпоративної мережі, забезпечуючи безпеку обох сторін.

6. Сумісність із пристроями. Підприємства можуть використовувати різні пристрої, включаючи ноутбуки, смартфони, планшети, IoT пристрої тощо. За таких умов Wi-Fi інфраструктура має бути сумісна з різними типами пристроїв та підтримувати різні стандарти Wi-Fi.

7. Резервування та відмовостійкість. Для забезпечення безперервної роботи мережі на підприємстві часто використовуються механізми резервування та відмовостійкості. Це може включати наявність резервних каналів зв'язку, дублювання обладнання, використання механізмів автоматичного відновлення тощо.

Проектування мережі Wi-Fi повинно враховувати зазначені особливості. Тоді буде забезпечена надійна, безпечна та продуктивна робота Wi-Fi на підприємствах, відповідаючи вимогам сучасного бізнесу [3].

У промислових умовах Wi-Fi мережі стикаються з низкою основних проблем та викликів, які можуть суттєво ускладнити їхню роботу та надійність. Нижче наведено деякі з цих проблем.

1. Електромагнітні завади. Промислові середовища часто характеризуються високою концентрацією електромагнітних завад різних типів устаткування, машин і металевих конструкцій. Це може призвести до інтерференції з Wi-Fi сигналом, що спричиняє падіння швидкості передачі даних та втрату з'єднання. Висока концентрація електромагнітних завад від обладнання та машин може вимагати від мережі Wi-Fi вищого ступеня завадозахищеності та здатності до корекції помилок.

2. Висока щільність пристроїв. На виробничих підприємствах та інших промислових середовищах може бути велика кількість підключених до Wi-Fi пристроїв, таких як портативні комп'ютери, сканери, мобільні пристрої тощо. Це створює конкуренцію за доступ до каналів зв'язку і може призвести до навантаження мережі. Велика кількість підключених пристроїв вимагає від мережі Wi-Fi більш високої пропускної здатності та здатності до керування трафіком для забезпечення стабільної роботи всієї мережі.

3. Фізичні перешкоди. У промислових приміщеннях можуть бути різні фізичні перешкоди, такі як стіни, металеві конструкції, обладнання тощо. Це може суттєво обмежити дальність і якість Wi-Fi сигналу, що потребує більш потужних пристроїв та антен для забезпечення повного покриття.

4. Вимоги до надійності та безпеки. У промислових середовищах потрібна висока надійність та безпека Wi-Fi мереж, особливо якщо вони використовуються для управління виробничими процесами, контролю обладнання або передачі критично важливої інформації. Це включає не тільки захист від зовнішніх загроз, але і гарантоване з'єднання за будь-яких умов.

5. 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.

6. Складність управління та моніторингу. Промислові мережі часто мають складну топологію та високі вимоги до управління та моніторингу. Це може стати проблемою для адміністраторів мережі під час налаштування, налагодження та обслуговування Wi-Fi інфраструктури.

Ці проблеми та виклики вимагають спеціальних рішень та технологій для адаптації Wi-Fi мереж до промислових умов, таких як використання завадостійких модуляцій, розгортання мереж Mesh, застосування засобів керування трафіком та безпеки, а також оптимізація продуктивності мережі.

Промислові середовища різноманітні і можуть включати різні типи підприємств і об'єктів, кожен з яких має свої особливості. Ось кілька типових промислових середовищ та особливостей їхньої інфраструктури.

1. Виробничі підприємства.

Зазвичай мають велику площу з різними зонами: виробничі цехи, складські приміщення, офісні будинки тощо. Висока концентрація обладнання та машин, що може створювати електромагнітні перешкоди та потребує надійної роботи Wi-Fi мереж навіть за умов високої завантаженості.

2. Склади та логістичні центри.

Вимагають широкого покриття сигналу Wi-Fi на всій території складу для забезпечення безперебійного зв'язку з портативними пристроями сканування та керування запасами. Можлива наявність металевих конструкцій та великої кількості вантажів, що може створювати перешкоди для безпроводного зв'язку.

3. Нафтогазові та хімічні підприємства.

Особливо вимогливі до безпеки мережі через потенційну небезпеку вибухів та хімічних витоків. Високі вимоги до надійності мережі в умовах високих температур, агресивного середовища та вібрацій.

4. Транспортні вузли (аеропорти, залізничні станції).

Вимагають високої продуктивності мережі для забезпечення зв'язку із системами керування транспортом, інформаційними табло, квитковими автоматами тощо. Можлива велика кількість рухомих об'єктів, що створює додаткові виклики для підтримки безперервного зв'язку.

5. Промислові ділянки та заводи.

Вимагають високої надійності мережі в умовах підвищеного рівня шуму та вібрацій від обладнання. Часто потребують використання Wi-Fi для моніторингу та управління процесами виробництва та обладнання.

Наведено декілька прикладів типових промислових середовищ та особливостей їхньої інфраструктури. Кожна галузь має свої унікальні вимоги до Wi-Fi мереж, і адаптація Wi-Fi до промислових умов потребує врахування конкретних особливостей кожного підприємства чи об'єкта. У даній роботі не буде прив'язки до певного типу промислового середовища – основна мета окреслити якомога ширше всю проблематику цього специфічного застосування мережі безпроводного доступу Wi-Fi.

1.1 Джерела завад для мереж Wi-Fi та шляхи зменшення їх впливу

Як відомо, у безпроводних мережах передача даних відбувається без використання кабельних з'єднань. З цієї причини на роботу безпроводних мереж впливає більша кількість різноманітних перешкод.

Проаналізуємо найпоширеніші причини, що впливають на роботу безпроводних мереж Wi-Fi, та оцінимо можливість забезпечення їх нормальної роботи у таких умовах.

1. Інші Wi-Fi-пристрої (точки доступу, безпроводні камери тощо), що працюють у радіусі дії вашого пристрою та використовують той же частотний діапазон.

Відомо, що Wi-Fi-пристрої піддаються впливу достатньо невеликих перешкод, якщо у них спільний частотний діапазон. У даному випадку мова йде фактично про два частотних діапазони - 2,4 і 5 ГГц.

На рисунку 1.1 показано спектри 11 каналів. Кольорове кодування позначає групи каналів, які не перетинаються - [1,6,11], [2,7], [3,8], [4,9], [5,10]. У межах однієї зони покриття рекомендується безпроводні мережі налаштовувати на канали, що не перетинаються. На них буде менший рівень інтерференції та колізій (конфліктів). Для протоколу 802.11n і ширини каналу 20 МГц номери каналів, що не перетинаються, – 1, 6 і 11. Якщо ширина каналу 40 МГц – то це канали 3 і 11 [2, 3]. (Інтерференція – це взаємодія з сигналом, що передається іншими випромінювачами (вони можуть бути або не бути частиною мережі Wi-Fi) на тому ж каналі (або близькому до нього), на якому веде мовлення ваша точка доступу).

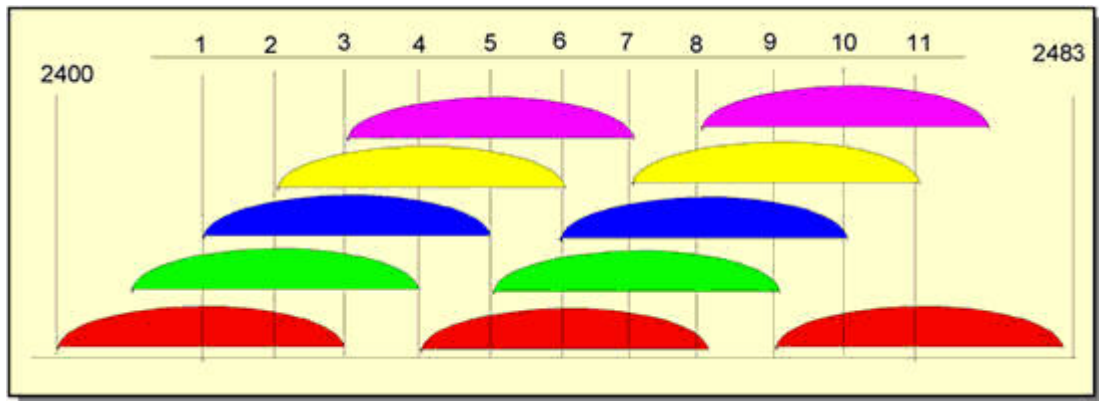


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення 11 каналів стандарту Wi-Fi

Для визначення найбільш вільного каналу Wi-Fi можна скористатися спеціальною утилітою InSSIDer: «Як просканувати мережу Wi-Fi і визначити найбільш вільний канал».

Якщо безпроводний адаптер, встановлений на комп'ютері або /ноутбуці/, планшетному ПК чи смартфоні, призначений для використання в США (наприклад, у пристроях Apple), тоді можуть працювати тільки канали з 1 по 11. У іншому випадку необхідно вручну встановити номер каналу з діапазону від 1 до 11.

2. Є випадки, коли для нормальної роботи точки доступу потрібно знизити потужність сигналу Wi-Fi до рівня 50-75%.

2.1. Стабільність і швидкість не завжди пов'язані з використанням занадто великої потужності сигналу Wi-Fi.

Якщо радіоефір сильно завантажений і потужність сигналу висока, то можуть проявитися внутрішньоканальні і міжканальні завади. Такі завади впливають на продуктивність мережі, оскільки вони різко збільшують рівень шуму, що призводить до низької стабільності зв'язку через постійне перенаправлення пакетів. Необхідно зменшити потужність передавача. Можна використати інші способи: відкрити антену на точці доступу, збільшити відстань між точкою доступу і адаптером, використовувати антену з нижчим коефіцієнтом підсилення сигналу.

2.2. Потужність передавача точки доступу в роутері зазвичай вища у 2-3 рази, ніж на клієнтських мобільних пристроях. Від різних значень потужностей та чутливості приймачів у каналі зв'язку виникає асиметрія. Для забезпечення хорошого рівня сигналу потрібно якомога симетричніше з'єднання, щоб точка доступу та клієнт впевнено чули один одного [3, 4]. Для цього іноді слід знизити потужність передавача в точці доступу.

3. У частотному діапазоні 2.4 ГГц працюють Bluetooth-пристрої, бездротові клавіатури та миші. Вони можуть впливати на роботу точки доступу.

Що стосується технології Bluetooth, то проблема полягає в тому, що вони та бездротові локальні мережі стандарту 802.11 базуються на двох різних технологіях модуляції. Пристрої Bluetooth використовують модуляцію FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – псевдовипадкова перебудова робочої

частоти) і їхні радіочастотні сигнали використовують частоти у всьому частотному діапазоні 2,4 ГГц. У бездротових локальних мережах стандарту 802.11 використовуються у цьому частотному діапазоні 2,4 ГГц канали з фіксованою смугою частот. В результаті, якщо пристрої Bluetooth працюють на мережі або в безпосередній близькості від неї, точкам доступу стандарту 802.11 важко уникнути радіочастотних перешкод.

Рекомендовані дії. Щоб звести до мінімуму або усунути радіочастотні завади, що впливають на бездротову локальну мережу стандарту 802.11, після успішного пошуку пристроїв Bluetooth, що вносять перешкоди, рекомендується виконати такі дії [4]:

- Замість бездротової локальної мережі частотного діапазону 2,4 ГГц використовуйте мережу діапазону 5 ГГц, що дозволить уникнути радіочастотних перешкод від пристроїв Bluetooth, що працюють у переповненому діапазоні 2,4 ГГц.

- Можна використовувати пристрої зі специфікацією Bluetooth версії 1.2 або пізнішої, у яких використовується технологія AFH (Adaptive Frequency Hopping – адаптивна перебудова частоти). У разі виявлення завад ця технологія обмежує використання пристроями Bluetooth псевдовипадкових частот. Це допомагає запобігти негативному впливу пристроїв Bluetooth на інші передавальні пристрої, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц.

- Можна використовувати пристрої Bluetooth, що базуються на специфікації Bluetooth версії 4.0 або пізнішої, у якій використовується технологія LE (Low Energy – Низька енергія). Ця технологія дозволяє обмежувати величину завад.

4. Великі відстані між Wi-Fi-пристроями.

Відомо, що бездротові пристрої Wi-Fi мають обмежений радіус дії. У приміщенні, зокрема, залежно від конфігурації кімнат, наявності капітальних стін та їх кількості дальність дії бездротової точки доступу може бути обмежена кількома десятками метрів.

5. Перешкоди.

Мова йде про стіни, стелі, меблі, металеві двері тощо. Якщо вони розташовані між Wi-Fi-пристроями, то такі перешкоди можуть відбивати або поглинати радіосигнали, що призводить до часткової або повної втрати сигналу. У містах основною перешкодою для радіосигналу є будівлі. Наявність капітальних стін, штукатурки на стінах, сталевих каркасів тощо впливає на якість роботи Wi-Fi-пристроїв. Приблизно на 3 дБ послаблює сигнал людське тіло.

Є дані щодо втрат ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища. Вони наведені у таблиці 1.1 для частоти 2.4 ГГц.

Ефективна відстань (див. таблицю 1.1) – зменшення у відсотках радіусу дії сигналу Wi-Fi.

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

За межами приміщень впливати на якість сигналу, що передається, може ландшафт місцевості. Дощ, гроза, снігопад також можуть бути причиною зменшення продуктивності безпроводної мережі.

6. Різна побутова техніка, причому це може стосуватися і промислових середовищ.

Очевидно мова йде про техніку з робочими частотами Wi-Fi [5]:

- Мікрохвильові НВЧ-печі. Ці пристрої можуть послаблювати рівень сигналу Wi-Fi, оскільки зазвичай також працюють у діапазоні 2,4 ГГц.
- Електродвигуни, монітори з ЕПТ, бездротові телефони, бездротові динаміки.
- Лінії електропередач та силові підстанції, можуть бути джерелами завад.

7. Пристрої, що працюють за стандартом USB 3.0.

Завади у цьому випадку породжуються пристроями, що підключаються, через інтерфейс USB 3.0. Причиною може бути відсутність або недостатнє екранування кабелю або конектора пристрою, що підключається, що може призвести до завад (інтерференції) на частотах в діапазоні 2,4 ГГц.

1.2 Фактори, що визначають швидкість передачі інформації у мережах Wi-Fi

Для мереж Wi-Fi, які працюють у промислових середовищах, як і для будь-яких ШСД, важливим параметром є швидкість передачі інформації. Продовжуючи попередній аналіз, зосередимось тепер на факторах, які впливають на його значення, та на можливості його збільшення.

Актуальними для мереж безпроводного доступу є наступні фактори, що визначають швидкість доступу:

- поширення у середовищі загального користування;
- багатопроменева інтерференція;
- Доплерівський ефект;
- частотно-залежне згасання.

Поширення сигналу у середовищі загального користування - атмосфері супроводжується суттєвими спотвореннями. До уже зазначених вище причин додамо згасання сигналу, пропорційне квадрату відстані, поглинання енергії сигналу компонентами атмосфери (гази, вологість, запиленість). Перелічені

фактори впливають на погіршення радіосигналів будь-якої частоти та потужності.

1.2.1 Багатопроменева інтерференція

Детальніше зупини мося на багатопроменевій інтерференції.

Багатопроменеве поширення виникає внаслідок проходження сигналу від антени передавача до антени приймача по кількох маршрутах, існування яких існує завдяки багаторазовим відбиттям від перешкод на шляху поширення. Траєкторії сигналів складаються природним чином, мають різну протяжність, а значить і час проходження (останній параметр називають затримкою сигналу). У приймальній антені відбувається накладення сигналів, внаслідок чого кожна з копій сигналу значно спотворюється. Кожне відбиття від перешкод призводить до зменшення потужності сигналу на 10-12 дБ, тобто навіть після трьох відбиттів сигнал має достатню потужність і цілком може бути розпізнаний.

Багатопроменева інтерференція найбільш спотворює широкосмугові сигнали. Причиною є те, що при широкій смузі сигналу одні частоти в результаті інтерференції підсумовуються (приходять синфазно), а інші, що прийшли іншим маршрутом (і затримані на півхвилі) віднімаються, послаблюючи сигнал на цій частоті.

Багатопроменева інтерференція має два варіанти негативного впливу на сигнал [4, 5]:

1) внутрішньосимвольна інтерференція, коли затримка між копіями сигналу не перевищує тривалості символу, і спотворення відбуваються у межах одного символу;

2) міжсимвольна інтерференція (ISI, inter symbol interference), коли затримка між копіями сигналу більша тривалості символу, що призводить до спотворення різних (зазвичай - сусідніх) символів.

Остання найбільш згубно впливає на передачу сигналу, оскільки змінюються всі параметри сигналу – амплітуда та фаза, і відновити такий сигнал дуже складно. Вплив міжсимвольної інтерференції представлено на

рисунку 1.2: для наглядності використано випадок, коли після серії нулів йде одинична одиниця або одиночний нуль після серії одиниць.

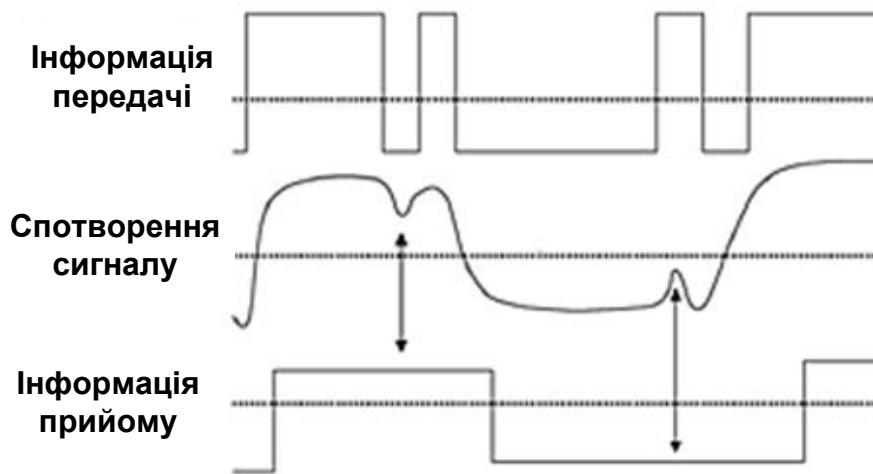


Рисунок 1.2 – Спотворення сигналу під впливом міжсимвольної інтерференції

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.

1.2.2 Частотно-залежне згасання

Проходження широкосмугового сигналу від передавача до приймача супроводжується ще одним типом спотворення - частотно-залежне згасання. Внаслідок відбиттів широкосмугового сигналу від перешкод, що мають частотно-залежні поглинаючі властивості, а також резонансних властивостей газів, що наповнюють атмосферу, тощо окремі частоти широкосмугового сигналу, що передається, значно згасають, не дозволяючи розпізнати інформацію, що передається, рисунок 1.3 [3, 5].

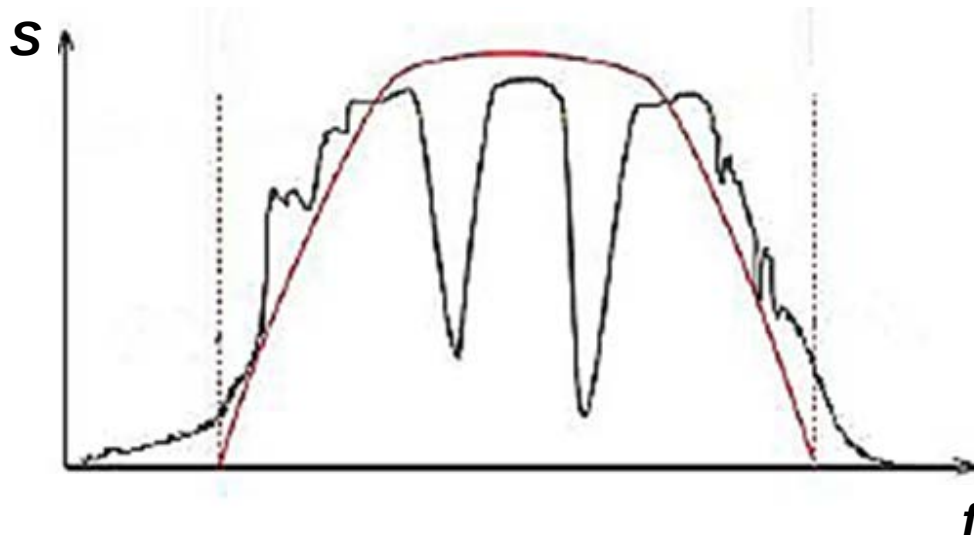


Рисунок 1.3 – Спотворення спектру сигналу при відбитті від перешкод

Поверхні перешкоди властиво у тій чи іншій мірі відбивати та поглинати електромагнітні хвилі різної частоти випромінювання. Траєкторії поширення сигналу в умовах щільної міської забудови (отже, багаторазових відбитків) не передбачувані; стан атмосфери (склад, щільність газів, запиленість, вологість) динамічно змінюється. Таким чином, частотно-залежні спотворення широкосмугового сигналу не прогнозовані.

Ефективним протистоянням частотно-селективному загасанню широкосмугового сигналу є такий вид модуляції, як ортогональне частотне розділення каналів з мультимплексуванням (OFDM - Orthogonal frequency-division multiplexing).

1.2.3 Доплерівський ефект

Ефект Доплера виникає внаслідок руху приймача (або передавача) і проявляється в тому, що частота коливань, що приймаються, буде змінюватися по відношенні до частоти генератора – збільшуватися при зближенні приймача і передавача, і зменшуватись при їх віддаленні. Величина зсуву частоти $\pm F_d$ сигналу, що приймається, залежить від швидкості руху v , частоти сигналу F_o і кута α між напрямком на передавач та напрямком руху:

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

Рух абонента (по напрямку та швидкості) не передбачувані, крім того наявність нерівностей рельєфу місцевості призводить до зміни частоти, а також амплітуди і фази сигналу, що приймається, за випадковим законом. Непередбачувані зміни частоти сигналу розглядають як паразитну девіацію частоти і називають доплерівським розсіянням. Доплерівське розсіювання призводить до нестабільного у часі "розмазування" спектру сигналу, що передається, внаслідок чого когерентний прийом супроводжується частотними спотвореннями.

Випадкові зміни амплітуди та фази, спричинені рельєфом місцевості, призводять до селективних завмирань сигналу. Для їх характеристики введено параметр часу когерентності $C_0 = 1/F_0$, що сприймається як інтервал часу, протягом якого коефіцієнт кореляції обвідної не перевищує 0,9.

Таким чином, на спотворення широкосмугового радіосигналу при його поширенні в атмосфері впливають такі основні фактори [6]:

- вплив завад;
- ослаблення зі збільшенням відстані;
- згасання в атмосфері;
- міжсимвольна інтерференція;
- частотно-залежне згасання;
- доплерівський ефект.

1.3 Методи збільшення швидкості передачі інформації каналу доступу

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 визначені (детерміновані) передавачем, параметр N є властивістю середовища поширення. Таким чином, швидкість передачі інформації в радіоканалі фактично визначається значенням повної шумової потужності у смузі пропускання (або, простіше, рівня шуму).

Однак рівень шуму на території не постійний у часу. Системи широкосмугового бездротового доступу, як правило, використовують (зокрема) часовий поділ сигналів (тобто розбиття потоку на тайм-слоти), причому, достатньо малі (менше 1 мс), щоб рівень шуму міг змінити значення. Саме ця обставина і використовується в мережах бездротового доступу для підвищення швидкості передачі інформації в моменти часу, коли рівень шуму малий.

Теорема Шеннона-Хартлі справедлива під час передачі бітової інформації. Для більш складних сигналів, що несуть кілька біт інформації у одиницю часу, тобто символів, швидкість передачі буде вищою. Сучасні мережі безпроводного доступу для збільшення пропускної спроможності каналу зв'язку оперують комбінуванням двох основних методів підготовки сигналу:

- метод кодового розділення CDMA, що полягає у заміщенні біта інформації ортогональною чіпковою послідовністю;
- квадратурна амплітудна модуляція (КАМ), що полягає у заміщенні біта корисної інформації символом, що переносить декілька біт інформації.

Вибір того чи іншого методу підготовки сигналу здійснюється передавальним обладнанням на основі аналізу якості каналу (тобто сигнал/шум). Передавальне обладнання постійно моніторить частотно-часовий канал, призначений для передачі, з метою визначення його якості. В ті тайм-слоти, коли якість каналу зв'язку хороша, передавальне обладнання може передавати інформацію з більш високою швидкістю.

Облік умов поширення радіохвиль у каналі зв'язку та адаптація до них шляхом вибору найбільш підходящої схеми модуляції та кодування забезпечують максимальну пропускну спроможність мережі доступу. Для прикладу, існують стандарти, у яких точність визначення необхідної випромінюваної потужності складає 0,5 дБ, а кількість можливих схем модуляції та кодування – 29.

В стандартах Wi-Fi, які найбільш адаптовані до роботи в промислових середовищах, використовується вже зазначена вище технологія OFDM з квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ) на множині піднесущих. Розглянемо основні аспекти цієї модуляції.

1.4 Реалізація I/Q методу для квадратурної амплітудної модуляції

Квадратурна амплітудна модуляція (КАМ) характеризується тим, що кожний канальний 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]:

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

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

$A_i \exp(j\varphi_i)$ є комплексною амплітудою цього канального символу;

$i = 1, 2, \dots, M$.

Запишемо фазоманіпульований сигнал (символ з амплітудою A) у вигляді [7]:

$$\begin{aligned} s_{QAM}(t) &= A \cos(\omega_0 t + \varphi) = A \cos \varphi \cdot \cos \omega_0 t - A \sin \varphi \cdot \sin \omega_0 t = \\ &= I(t) \cdot \cos \omega_0 t - Q(t) \cdot \sin \omega_0 t. \end{aligned} \quad (1.4)$$

$I(t)$ та $Q(t)$ – амплітуди синфазної та квадратурної компонент модульованого сигналу, які на інтервалі $(i - 1)T_c < t \leq iT_c$, характеризуються 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).

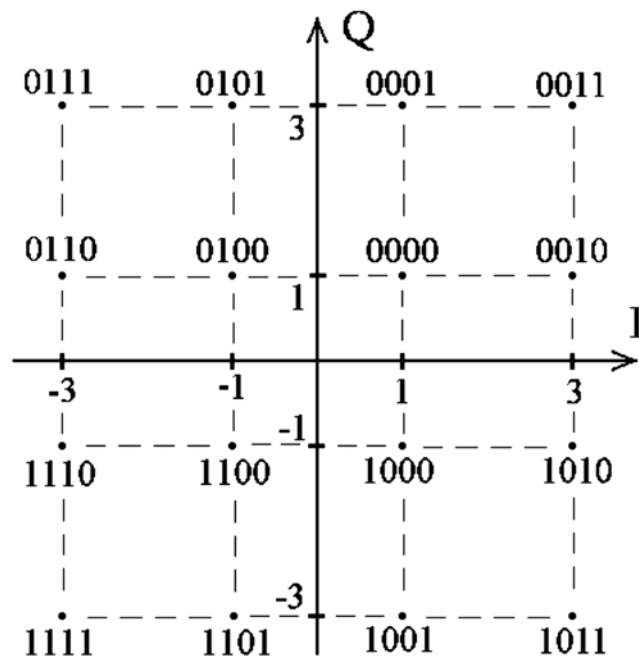


Рисунок 1.4 – Сигнальне сузір'я модуляції QAM-16

Для синфазної і квадратурної складових несущого коливання використовується одне і те ж значення дискрету зміни амплітуди. Тому на фазовій площині дійсної $\text{Re}(z)$ і уявної $\text{Im}(z)$ складових вектора модульованого сигналу кінці векторів утворюють прямокутну сітку. Значення позиційності алгоритму QAM визначає число вузлів цієї сітки. Сигнальне сузір'я для QAM-16 наведено на рисунку 1.4.

У позначенні алгоритму QAM-N число N набуває значення 2^n . Це максимальна кількість різновидів модульованого сигналу. Показник n – це теоретичний показник спектральної ефективності даного алгоритму. Рівень або позиційність модуляції визначає кількість біт, які передаються одним символом несущої. Для прикладу – один символ QAM-16 передає 4 біти інформації, QAM-32 – 5 біт, QAM-64 – 6 біт і т.д.

На рисунку 1.5 наведено спрощену структуру модулятора QAM-16 модульованого сигналу.

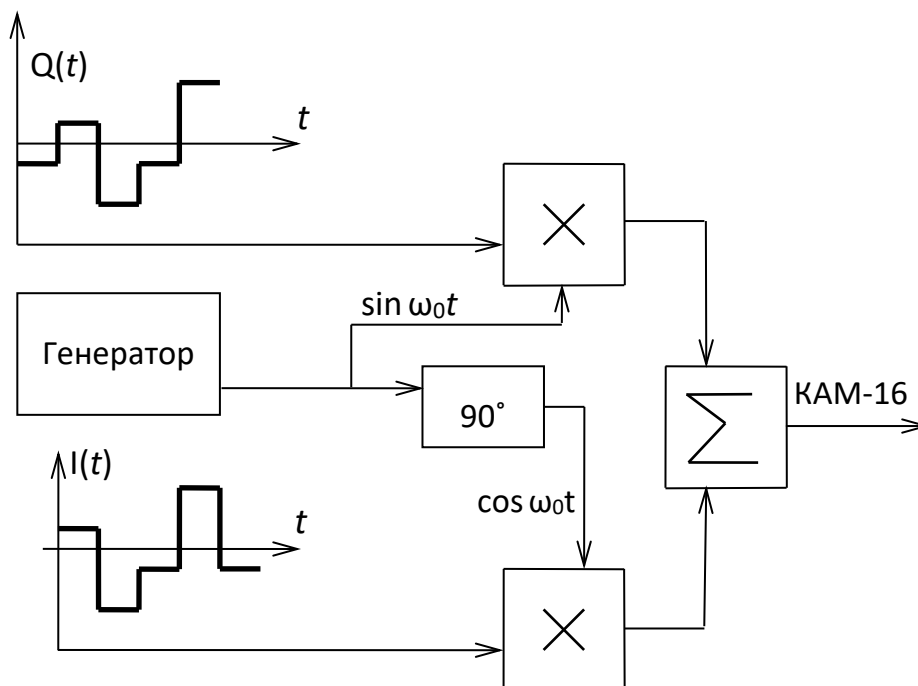


Рисунок 1.5 – Спрощена структурна схема модулятора QAM-16

На рисунку 1.5, показані зміни амплітуд синфазної та квадратурної компонент залежно від виду кодових комбінацій. Це чотирьохпозиційні дискретні

сигнали, які діють на входах помножувачів. Для QAM-16 значення I_k та Q_k належать множині $(1,3,-1,-3)$. Реалізація знаків «плюс/мінус» амплітуд синфазної I_k та квадратурної Q_k компонент відбувається у помножувачах наведеної схеми зміною фази синусоїдальної та косинусоїдальної несущих на 180° . Амплітуди синфазної та квадратурної компонент $(1,3,-1,-3)$ мають відносний характер.

Швидкість передачі даних і завадостійкість зі збільшенням порядку модуляції змінюються в регресивних напрямках. Схеми модуляції вищого порядку мають нижчу завадостійкість [7, 8].

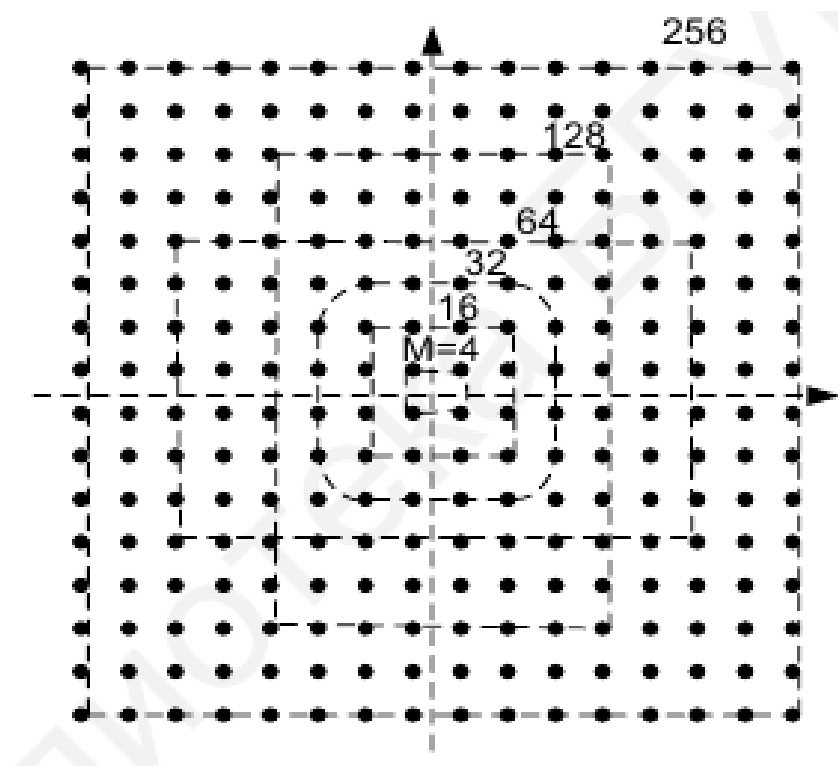


Рисунок 1.6 – Сигнальна діаграма QAM-N різної позиційності

У сучасних системах використовують адаптацію до каналних умов. Йдеться про вибір схеми модуляції, яка забезпечує найвищу швидкість передачі даних для заданих умов. З цією метою відстежується рівень сигнал-шум у каналі передачі. В результаті досягається ефективна передача даних з найменшим відсотком помилок.

Спектральна ефективність і завадостійкість КАМ змінюються у взаємно протилежних напрямках. Аналіз сузір'я показує, що збільшення кількості точок

сузір'я призводить до зменшення відстані d між ними. Імовірність помилок при розпізнаванні вектора Z зростає через вплив завад у радіоканалі. Ці завади призводять до виникнення непередбачуваних змін амплітуди та фази переданого сигналу. При квадратурній амплітудній модуляції сигнальні точки розташовані на комплексній площині рівномірно і це збільшує відстань між сусідніми сигнальними точками, що покращує завадозахищеність системи зв'язку з КАМ. Зауважимо, що при фазовій модуляції всі сигнальні точки розташовані по колу комплексної площини. Якщо має місце збільшення порядку фазової модуляції, то відстань між кінцями сусідніх векторів зменшується і зменшується завадостійкість. Для КАМ ця залежність слабша.

1.5 Висновки до розділу

У промислових умовах Wi-Fi мережі стикаються з низкою проблем та викликів, які можуть суттєво ускладнити їхню роботу та надійність. Нижче наведено основні проблеми.

Електромагнітні завади, висока щільність пристроїв, фізичні перешкоди, вимоги до надійності та безпеки, високі вимоги до продуктивності, складність управління та моніторингу. Ці проблеми та виклики вимагають спеціальних рішень та технологій для адаптації Wi-Fi мереж до промислових умов, таких як використання завадостійких модуляцій, розгортання мереж Mesh, застосування засобів керування трафіком та безпеки, а також оптимізація продуктивності мережі.

Проаналізовано найпоширеніші причини, що впливають на роботу безпроводних мереж Wi-Fi у промислових умовах, та сформульовані рекомендації щодо можливості забезпечення їх нормальної роботи у таких умовах. Для забезпечення сумісності з аналогічними Wi-Fi-пристроями (точки доступу, безпроводні камери тощо) рекомендовано звернути увагу на вибір частотного каналу роутера. Буває доцільно знизити потужність сигналу Wi-Fi до рівня 50-75%. Стосовно пристроїв Bluetooth - щоб звести до мінімуму або

усунути радіочастотні завади від них на бездротову локальну мережу стандарту 802.11 рекомендується виконати такі дії:

- замість мережі Wi-Fi частотного діапазону 2,4 ГГц використати мережу діапазону 5 ГГц, що дозволить уникнути радіочастотних перешкод від пристроїв Bluetooth, що працюють у переповненому діапазоні 2,4 ГГц;
- використовувати пристрої зі специфікацією Bluetooth версії 1.2 або пізнішої, у яких використовується технологія AFH (Adaptive Frequency Hopping – адаптивна перебудова частоти). У разі виявлення завад ця технологія обмежує використання пристроями Bluetooth псевдовипадкових частот. Це допомагає запобігти негативному впливу пристроїв Bluetooth на інші передавальні пристрої, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц.

Для частотного діапазону 2.4 ГГц, наведено втрати ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища. Виконано аналіз факторів, які впливають на основний параметр мережі Wi-Fi – швидкості передачі даних. До цих факторів віднесено: поширення у середовищі загального користування; інтерференція; доплерівський ефект; частотно-залежне згасання.

Показано, що для досягнення найбільшої швидкості виконується аналіз якості каналу (оцінюється співвідношення сигнал/шум). Передавальне обладнання постійно моніторить частотно-часовий канал, призначений для передачі, з метою визначення його якості. В ті тайм-слоти, коли якість каналу зв'язку хороша, передавальне обладнання може передавати інформацію з більш високою швидкістю.

В стандартах Wi-Fi, які найбільш адаптовані до роботи в промислових середовищах, використовується технологія OFDM з квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ) на множині піднесущих. Розглянуто математичні аспекти методу формування символів квадратурної амплітудної модуляції з використанням квадратурних компонент.

2 ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРОТОКОЛИ АДАПТАЦІЇ Wi-Fi ДО ПРОМИСЛОВИХ УМОВ РОБОТИ

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. Ось кілька стандартів Wi-Fi, які рекомендовано застосовувати у промислових середовищах [8].

1. Wi-Fi 6 (802.11ax) – є останнім стандартом Wi-Fi, який забезпечує значне збільшення швидкості передачі даних, щільності підключення пристроїв, енергоефективність та покращену продуктивність у щільних мережах. Цей стандарт особливо корисний у промислових середовищах з високою кількістю пристроїв та високими вимогами до пропускнуої спроможності. Отже, це стандарт, який характеризується високими енергетичною та спектральною ефективністю.

2. Wi-Fi 5 (802.11ac) – передує Wi-Fi 6 і також забезпечує високу швидкість передачі даних та продуктивність. Він може бути хорошим вибором для промислових середовищ, особливо якщо потрібно більш стабільне та продуктивне з'єднання, ніж попередні стандарти.

3. Wi-Fi 4 (802.11n) – також може використовуватися в промислових середовищах, особливо якщо потрібна підтримка старих пристроїв або нижча вартість обладнання. Він забезпечує покращену продуктивність порівняно з попередніми стандартами, такими як 802.11b/g.

4. 802.11ah (Wi-Fi HaLow). Цей стандарт розроблений спеціально для промислових та IoT (інтернет речей) додатків. Він забезпечує велику дальність передачі даних та стійкість до завад, що робить його придатним для використання в умовах, де потрібне широке покриття та надійне з'єднання.

5. 802.11s (Wi-Fi Mesh). Wi-Fi мережі з використанням технології Mesh можуть бути корисні у промислових середовищах, де потрібна гнучкість та

масштабованість. Мережі Mesh дозволяють створювати розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла.

Вибір того чи іншого стандарту Wi-Fi залежить від конкретних потреб та вимог промислового підприємства, включаючи щільність пристроїв, швидкість передачі даних, вимоги до дальності та надійності з'єднання.

Зазначена група стандартів має свої особливості, які ми проаналізуємо у наступних розділах роботи. Також з'ясуємо, які технологічні рішення дають для цих стандартів високу енергетичну та спектральну ефективності.

2.1 Технологічні вимоги щодо адаптації Wi-Fi до промислових умов

Дослідження технологій та протоколів, що використовуються для адаптації Wi-Fi до промислових умов, є важливим етапом визначення оптимальних рішень для промислових мереж. Ось деякі з технологій та протоколів, які часто застосовуються для адаптації Wi-Fi до промислових умов [9].

1. Завадостійкі види модуляції. Використання завадостійких модуляцій, таких як OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) та OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), дозволяє покращити стійкість до електромагнітних завад та зменшити ймовірність помилок. Ця технологія передбачає використання на піднесущих квадратурної амплітудної модуляції з можливістю адаптації її позиційності до завадової обстановки в каналі.

2. Розраховані на багато користувачів технології (MU-MIMO). Технологія MU-MIMO дозволяє одночасну передачу даних кільком користувачам на різних напрямках, що підвищує продуктивність і ефективність мережі в умовах високого завантаження.

3. Beamforming. Ця технологія дозволяє спрямовувати сигнал Wi-Fi у певний напрямок, покращуючи дальність та стабільність з'єднання, особливо в умовах із високим рівнем перешкод або в обмеженому просторі.

4. Mesh-мережі. Мережі Mesh надають більш гнучке та надійне рішення для покриття великих промислових об'єктів. Ця технологія дозволяє створювати розподілені мережі з автоматичним відновленням з'єднання у разі відмови будь-якого вузла.

5. Протоколи керування трафіком. Застосування протоколів керування трафіком, таких як QoS (Quality of Service) та TSPEC (Traffic Specification), дозволяє забезпечити пріоритетну передачу даних з високими вимогами до продуктивності, такими як потокове відео або голосовий зв'язок.

6. Протоколи безпеки. Використання протоколів безпеки, таких як WPA3 (Wi-Fi Protected Access 3) та 802.1X, забезпечує захист від несанкціонованого доступу та захист даних у промислових мережах.

7. Протоколи автоматичного налаштування та керування. Застосування протоколів автоматичного налаштування та керування, таких як CAPWAP (Control and Provisioning of Wireless Access Points), дозволяє спростити розгортання та керування великими промисловими Wi-Fi мережами.

Поглиблений аналіз цих та інших технологій та протоколів дозволяє вибрати оптимальні рішення для адаптації Wi-Fi до промислових умов, враховуючи конкретні вимоги та особливості середовища.

Найважливішим аспектом у технологіях Wi-Fi, завдяки чому реалізується їх адаптація до промислових умов, є завадостійкі види модуляції. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні надійної роботи Wi-Fi у промислових умовах.

1. Зниження впливу завад. Промислові середовища можуть бути захащені різними джерелами завад, такими як електромагнітні шуми від обладнання, металеві конструкції, радіочастотні інтерференції тощо.

2. Поліпшення прохідності сигналу. Робота у промислових умовах часто потребує передачі даних через товсті стіни, металеві конструкції чи великі відстані. Завадостійкі види модуляції можуть забезпечити кращу прохідність сигналу, що є особливо важливим для забезпечення зв'язку в важкодоступних місцях.

3. Скорочення помилок передачі. У промислових умовах навіть невелика кількість помилок передачі може мати серйозні наслідки. Завадостійкі види модуляції зазвичай мають більш високу здатність до корекції помилок, що зменшує ймовірність втрати даних і підвищує надійність мережі.

4. Підвищення продуктивності. Використання завадостійких модуляцій може також підвищити продуктивність мережі, оскільки зменшується кількість пакетів, що пересилаються повторно через помилки передачі даних (системи зі зворотним зв'язком).

5. Поліпшення загальної надійності мережі. На підприємствах та у промислових середовищах часто потрібна висока доступність мережі. Завадостійкі модуляції сприяють підвищенню загальної надійності Wi-Fi з'єднання, зменшуючи ймовірність збоїв та переривань зв'язку.

Таким чином, завадостійкі види модуляції відіграють критичну роль у забезпеченні надійної та стабільної роботи Wi-Fi в умовах промисловості, де є різні джерела завад і вимоги до високої продуктивності мережі.

2.2 Прикладна оцінка стандартів Wi-Fi

Розглянемо детальніше зазначені на початку розділу стандарти, які є найперспективнішими для використання в промислових середовищах. Звернемо увагу на втілення у них технологічних вимог та видів модуляції. В подальшому зупинимось на аналізі енергетичної та спектральної ефективності.

2.2.1 Стандарт 802.11n (Wi-Fi 4)

Стандарт 802.11n містить багато удосконалень порівняно з попередніми версіями. В основі стандарту 802.11n:

- збільшення швидкості передачі;
- збільшення зони покриття;
- збільшення надійності передачі сигналу;
- збільшення пропускної спроможності.

Стандарт 802.11n передбачає роботу в діапазонах 2.4 ГГц або 5.0 ГГц. На фізичному рівні (PHY) реалізовано вдосконалену обробку сигналу та модуляції, додано можливість використання чотирьох антен. На каналному рівні управління доступом до середовища (MAC) реалізовано більш ефективне використання доступної пропускної здатності. Все це дозволяє збільшити максимальну теоретичну швидкість передачі даних до 600 Мбіт/с (54 Мбіт/с стандарту 802.11a/g) [7-9].

Одним із важливих моментів стандарту 802.11n є підтримка технології MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, багатоканальний вхід/вихід), за допомогою якої можлива здатність одночасних прийому/передачі кількох потоків даних через кілька антен.

Стандарт 802.11n визначає різні антенні конфігурації "MxN" (найпоширеніші на сьогоднішній день це конфігурації "3x3" або "2x3"). M визначає кількість передавальних антен (T), а N - кількість приймальних антен (R). На рисунку 2.1 зображена точка доступу з двома передавальними та трьома приймальними антенами "2x3".

Чим більше антен пристрій 802.11n використовує, тим вища максимальна швидкість передачі даних. Однак основним у пристроях стандарту 802.11n є вдосконалення методу обробки сигналу. Це визначає при використанні декількох антен алгоритм роботи MIMO-пристрою.



Рисунок 2.1 – Точка доступу з двома передавальними та трьома приймальними антенами

При використанні модуляції 64-QAM конфігурація «4x4» забезпечує швидкість до 600 Мбіт/с, «3x3» - до 450 Мбіт/с, тоді як конфігурації «2x3» та «1x2» забезпечують швидкість до 300 Мбіт/с. При використанні MIMO «2x2» та підтримці модуляції 256-QAM (TurboQAM) на частоті 2,4 ГГц максимальна швидкість у цьому стандарті може становити 400 Мбіт/с. За аналогічних умов, але при використанні MIMO «4x4» максимальна швидкість у стандарті 802.11n вже становитиме 800 Мбіт/с.

Іншою додатковою особливістю стандарту 802.11n є збільшення ширини каналу з 20 МГц до 40 МГц. Відомо, що мережі стандарту 802.11n можуть працювати як на частоті 2.4 так і на частоті 5 ГГц.

У смузі частот 2.4 ГГц для бездротових мереж доступно 13 каналів (у деяких країнах 11) з інтервалами 5 МГц між ними. Бездротові пристрої стандарту 802.11b/g використовують канали завширшки 20 МГц. Пристрій стандарту 802.11b/g використовує один із 13 каналів зі смугою 20 МГц в межах частоти 2.4 ГГц, але фактично задіює 5 каналів, що перетинаються. Наприклад, якщо точка доступу використовує канал 6, вона створює завади у каналах 5 і 7, а також у каналах 4 і 8. При передачі радіосигнал має частотне відхилення від центральної частоти каналу +/- 11 МГц. У деяких випадках відхилення частоти становить до 30 МГц від центрального каналу. Для уникнення взаємних перешкод між каналами необхідно, щоб їх смуги відстояли одна від одної на 25 МГц. Таким чином, залишається всього 3 канали, що не перетинаються, на смузі 20 МГц: 1, 6 і 11. З шириною каналу 40 МГц непересічними є канали 3 і 11.

Бездротові точки доступу, що працюють у смузі частот 2,4 ГГц, в межах однієї зони обслуговування, що покривається, для забезпечення якості роботи безпроводної мережі повинні уникати перекриття каналів, рисунок 2.2 [9].

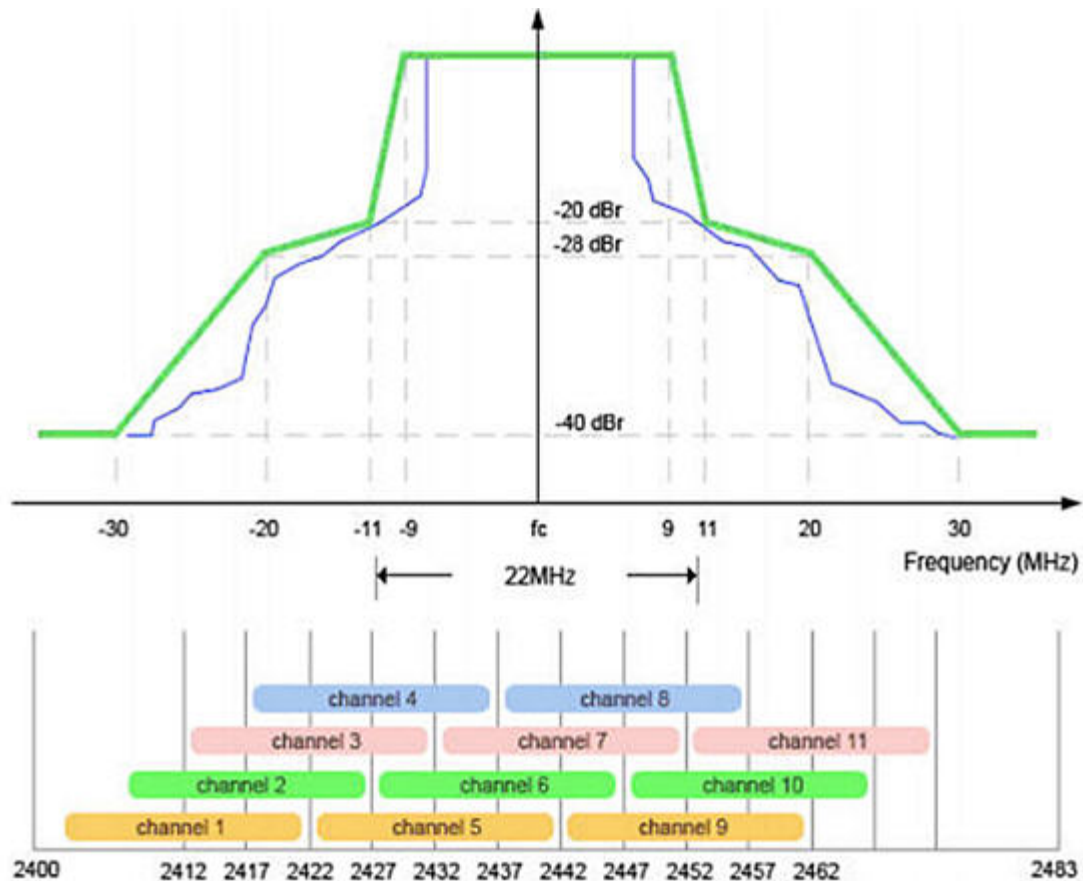


Рисунок 2.2 – Частотні канали на частоті 2,4 ГГц

Одним із основних моментів є питання сумісності бездротових пристроїв стандарту 802.11n з пристроями 802.11a/b/g.

Більшість бездротових локальних мереж 802.11n використовують канали 40 МГц лише на частоті 5 ГГц. У мережах з частотою 5 ГГц (802.11n), проблеми каналів, що перетинаються, не існує. Пристрої стандарту 802.11n можуть використовувати ширину каналу 20 чи 40 МГц у будь-якому частотному діапазоні (2.4 чи 5 ГГц). Ширина каналу 40 МГц дає подвійне збільшення пропускної спроможності порівняно з 20 МГц, тобто з пристроями 802.11b/g. На частоті 5 ГГц доступні 19 каналів, що не перетинаються. У стандарті 802.11n на цій частоті і з шириною смуги 40 МГц сигнали розподіляються без взаємного перекриття каналів. Але, при використанні пристроями 802.11n смуги 40 МГц їх роботі можуть заважати існуючі точки доступу 802.11b/g зі зниженням продуктивності всього сегмента мережі.

Існують три режими роботи 802.11n: HT, Non-HT та HT Mixed. Аналіз показує, що найпоширенішим для точок доступу 802.11n у найближчі кілька років є змішаний режим з високою пропускнуою здатністю HT Mixed. У цьому режимі удосконалення стандарту 802.11n можуть бути використані у спільних зонах з існуючими станціями стандарту 802.11b/g. Точка доступу 802.11n розпізнає наявність старих клієнтів і використовуватиме нижчу швидкість передачі даних, поки старий пристрій здійснює прийом-передачу даних.

При практичному застосуванні покращень стандарту 802.11n, переваги можуть бути досягнуті повною мірою лише за умови, що стандарт 802.11b/g «заморожений», а бездротова мережа працює в "чистому" режимі HT.

Значення індексу модуляції MCS визначені та показані в таблиці 2.1. [7].

Таблиця 2.1 – Значення індексу модуляції та схеми кодування

NCS index	Type	Coding rate	Spatial streams	Data rate (Mbps) with 20 MHz CH		Data rate (Mbps) 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

Стандарт 802.11n визначає індекс модуляції та схеми кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). MCS - просте ціле число, що присвоюється кожному варіанту модуляції (загалом можливо 77 варіантів). Кожен варіант визначає тип модуляції радіочастоти (Type), швидкість кодування (Coding Rate), захисний інтервал (Short Guard Interval) та значення швидкості передачі даних. Поєднання всіх цих факторів визначає реальну фізичну (PHY) або каналну швидкість передачі даних, починаючи від 6,5 Мбіт/с до 600 Мбіт/с (ця швидкість може бути досягнута за рахунок використання всіх можливих опцій стандарту 802.11n).

Тип модуляції та швидкість кодування визначають різновид символу, який передається в радіоефір. Спочатку була модуляція BPSK, яка не забезпечує високих швидкостей, але є завадостійкою. Методи модуляції (64-QAM) та кодування, як правило, більш ефективні та підтримують вищі швидкості передачі даних, але застарілі методи та швидкості все ще підтримуються для зворотної сумісності. Наприклад, для досягнення максимальної швидкості з'єднання 300 Мбіт/с необхідно, щоб і точка доступу та бездротовий адаптер підтримували два просторові потоки (Spatial Streams) і подвійну ширину каналу 40 МГц. З отриманої швидкості з'єднання за наведеною вище таблицею можна точно визначити, скільки потоків і яка ширина каналу були задіяні. Так швидкості з'єднання 65 або 130 Мбіт/с свідчать, що один з пристроїв - точка доступу або адаптер - використовують одинарну ширину каналу 20 МГц.

Розшифруємо значення деяких параметрів.

Короткий захисний інтервал SGI (Short Guard Interval) визначає інтервал часу між символами, що передаються (найменша одиниця даних, що передаються за один раз). Цей інтервал допомагає подолати відлуння при прийомі даних і уникнути затримки через міжсимвольні завади. У пристроях 802.11n є можливість використання паузи всього 400 нс (замість 800 нс у стандарті 802.11b/g). Коротші інтервали призвели б до більшого втручання та зниження пропускної спроможності, тоді як великі інтервали знижують

коефіцієнт використання середовища. Короткий захисний інтервал (SGI) може збільшити швидкість передачі даних до 11 відсотків.

Точки доступу 802.11n повинні підтримувати MCS значення від 0 до 15, у той час як станції 802.11n повинні підтримувати MCS значення від 0 до 7. Всі інші значення MCS, у тому числі пов'язані з каналами шириною 40 МГц, коротким захисним інтервалом (SGI) є опціональними. Визначення значення MCS і SGI для всіх пристроїв 802.11n є хорошим способом для визначення набору швидкостей передачі даних, які можуть бути використані безпроводною мережею.

Стандарт 802.11n використовує ті ж самі заходи безпеки 802.11i (WPA2), які використовувалися раніше на пристроях стандарту 802.11a/g. VPN може бути використаний для захисту кадрів 802.11n, незважаючи на те, що VPN-шлюзам необхідна підтримка більш високої пропускної здатності для забезпечення захисту.

Нова система запобігання вторгненням (IPS, Intrusion Prevention System) у бездротовій мережі працює також як і раніше і здатна виявляти та реагувати на небезпечні (Rogue AP) точки доступу 802.11n. Звертаємо вашу увагу, що можливе виявлення пристроїв 802.11n, що тільки працюють у режимах Non-HT або Mixed HT, але не в чистому режимі HT (Greenfield).

2.2.2 Стандарт 802.11ac (Wi-Fi 5)

Стандарт упроваджено у 2014 році. Максимальна пропускна здатність стандарту (діапазон 5 ГГц, ширина каналу 80 МГц) [10]:

- для однієї станції – не менше 500 Мбіт/с;
- для декількох станцій – не менше 1 Гбіт/с.

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

У стандарті IEEE 802.11ac закладена підтримка зворотної сумісності із пристроями стандартів IEEE 802.11a/n.

Швидкість бездротового доступу стандарту 802.11ac визначається трьома складовими:

- смуга пропускання каналу;
- щільність сигнального сузір'я;
- кількість просторових потоків.

У таблиці 2.2 представлені основні параметри стандарту 802.11ac з урахуванням класу абонентських пристроїв.

Таблиця 2.2 – Основні параметри стандарту IEEE 802.11ac

Номінальна 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.

Стандарт IEEE 802.11ac визначає роботу обладнання тільки в діапазоні 5 ГГц, на відміну від пристроїв 802.11n, які захоплюють діапазон 2,4 ГГц. Відмова від 2,4 ГГц обумовлена сильною «заселеністю» діапазону, відповідно - значними завадами.

Всі канали IEEE 802.11ac розміщуються в трьох сегментах діапазону, рисунок 2.3 [9, 10]:

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

У стандарті 802.11ac передбачена обов'язкова агрегація суміжних каналів: канали 20 МГц згруповані попарно для отримання каналів 40 МГц, канали 40 МГц згруповані для отримання каналів 80 МГц. Стандарт допускає агрегацію двох суміжних/несуміжних каналів 80 МГц в один 160 МГц. Усього максимально підтримується (див. рис. 2.3) до 24 каналів 20 МГц, до 11 каналів 40 МГц, до 5 каналів 80 МГц, 2 канали 160 МГц. Приклад використання двома точками доступу каналів в одній смузі 80 МГц, але з різними первинними каналами показано на рисунку 2.4.

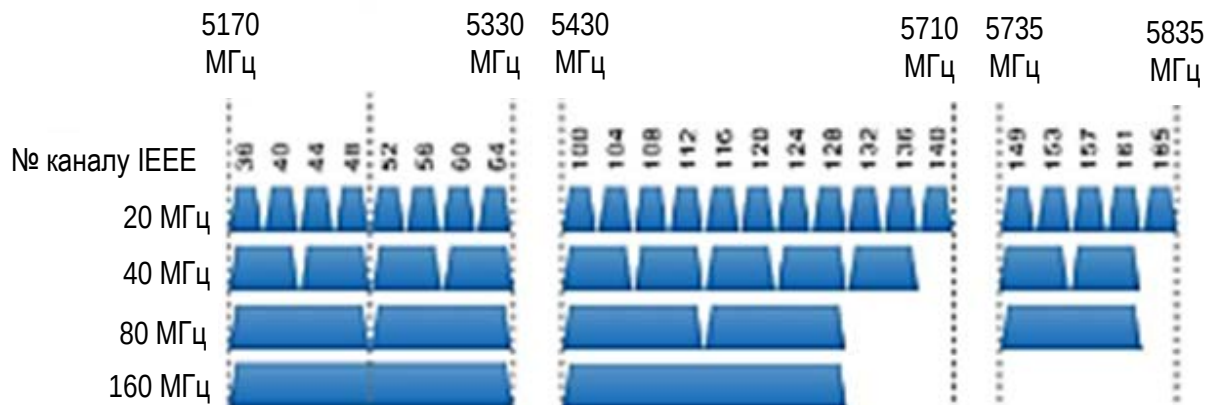


Рисунок 2.3 – Розподіл каналів у сегментах діапазону

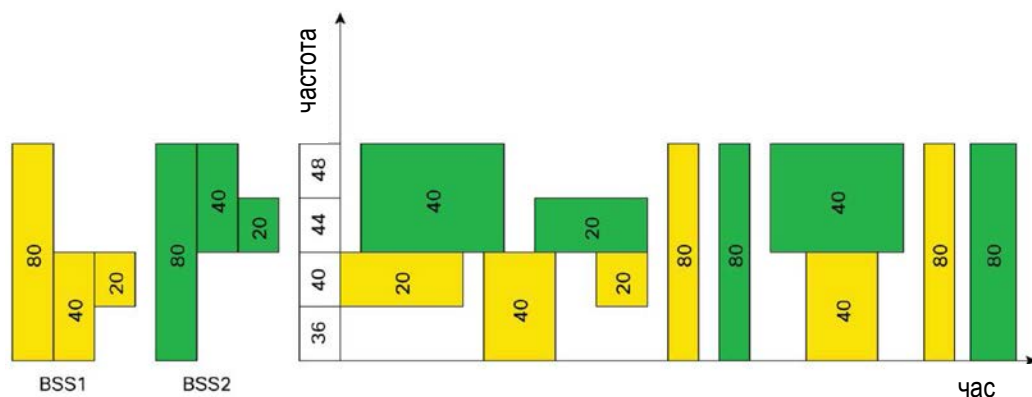


Рисунок 2.4 – Приклад паралельної передачі двох точок доступу

Можливість роботи з перекриттям каналів (але при різних первинних каналах) можлива при дотриманні наступних умов [11]:

- в 802.11ac підвищена чутливість для виявлення сигналів на вторинних каналах,
- у механізм обміну RTS/CTS включена індикація пропускнуої здатності каналів.

Розглянемо варіанти каналів: два по 80 МГц та один 160 МГц. Варіант 80+80 МГц має 10 можливих комбінацій (див. рис. 2.3) порівняно з двома можливими для 160 МГц, тобто тайм-слотів, коли можна використовувати канал 160 МГц, значно менше. З іншого боку пристрої, що підтримують приймання/передачу 80+80 МГц технічно складніші, оскільки містять вдвічі більше радіочастотних компонентів. Крім того, такий пристрій може працювати в двох режимах: з підтримкою двох просторових потоків 80 МГц або з одним просторовим потоком та каналами 80+80 МГц.

Формат преамбули у стандарті 802.11ac доступний для сприйняття пристроями попередніх специфікацій, що дозволяє останнім вилучити з преамбули інформацію про тривалість передачі пристроєм 802.11ac, і не передавати під час його передачі.

Особливості реалізації OFDM.

Таблиця 2.3 – 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

У 802.11ac кількість OFDM-піднесущих сигналу залежить від смуги каналу, що використовується (див. табл. 2.3). Частина піднесущих використовується як пілотні.

Через преамбулу в кожному каналі 20 МГц, яка необхідна для сумісності із застарілими пристроями 802.11a/n, виникає проблема пік-фактора. Для усунення цього ефекту, фаза верхніх піднесущих (див. табл. 2.3) в каналах 20 МГц зміщується (див. табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – 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	3 -192 по -1 і > 64	180 градусів
80+80	Як і в 80 МГц	Як і в 80 МГц

Схеми модуляції та кодування.

Таблиця 2.5 – 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	16KAM	$\frac{1}{2}$
4	16KAM	$\frac{3}{4}$
5	64KAM	$\frac{2}{3}$
6	64KAM	$\frac{3}{4}$
7	64KAM	$\frac{5}{6}$
8	256KAM	$\frac{3}{4}$
9	256KAM	$\frac{5}{6}$

Стандарт 802.11ac підтримує модуляції BPSK, QPSK, 16KAM та 64KAM (як і в 802.11n), але й надає можливість роботи з модуляцією 256KAM при смузі

каналу 80 МГц та 160 МГц. 256КАМ не вимагає більшої смуги каналу (ніж 64КАМ), але потребує «чистого» каналу, тому актуальна на коротких відстанях.

У 802.11ac кількість індексів модуляції та кодування значно знижено (див. табл. 2.5): для абонента встановлені тільки 10 схем модуляції та кодування MCS. Для порівняння – у 802.11n їхня кількість 77.

Підтримка несиметричних видів модуляції не знайшла значного застосування у пристроях 802.11n, тому в 802.11ac не передбачаються несиметричні види модуляції. Тобто. у багатопотоковій передачі всі потоки повинні мати один вид модуляції.

Технологія MU-MIMO.

У попередній специфікації закладено режим SU-MIMO, що забезпечує збільшення швидкості доступу одного користувача. В IEEE 802.11ac реалізована технологія багатокористувацького MU-MIMO, рисунок 2.5. MU-MIMO допускає використання до 8 просторових потоків, що поділяються 4 точками доступу (при обмеженні на одну точку доступу – не більше 4 потоків). Збільшення в порівнянні з 802.11n кількості просторових потоків дозволило подвоїти максимальну пропускну спроможність мережі 802.11ac.

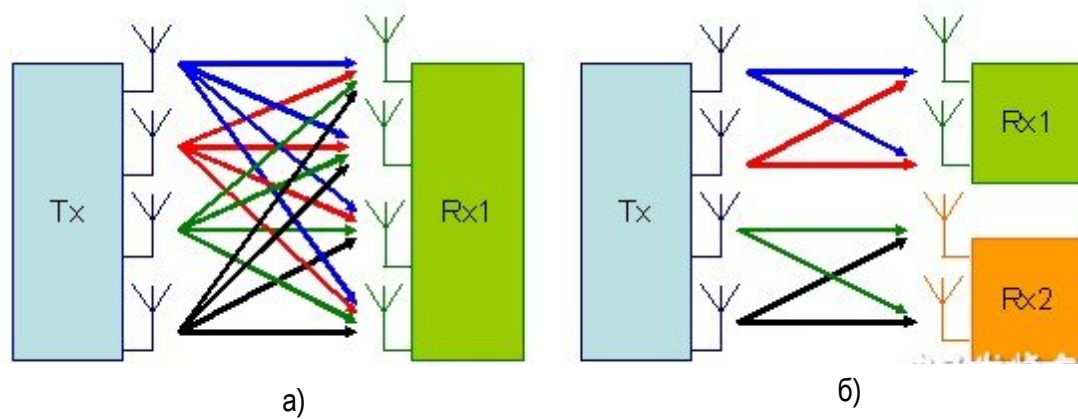


Рисунок 2.5 – Режими SU- і MU-MIMO:

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

Просторові потоки під час проходження через радіоканал об'єднуються в антени, один з них є корисним, інші - представляють завади. Завади від накладання «чужих» потоків усуваються за допомогою обробки в пристрої прийому.

Ще одна технологія, реалізована в IEEE 802.11ac - Beamforming-MIMO, формування променя в MIMO, що дозволяє змінювати діаграму спрямованості антени, адаптуючи її під конкретного абонента. Розглянемо роботу точки доступу в режимі формування променя під час роботи з трьома абонентськими станціями, рисунок 2.6. Для передачі даних абоненту 1, точка доступу формує до нього потужний промінь (діаграми спрямованості антени) - синя крива, верхня пелюстка. При цьому в напрямку абонента 2 і 3 енергія променю 1 мінімізується (на рисунку 2.6 показано вирізами в кривій синього кольору). Так само формуються сигнали абонентам 2 і 3 (червона та жовта криві): максимум променя спрямовано на «свого» абонента, вирізи – на «чужого» абонента.

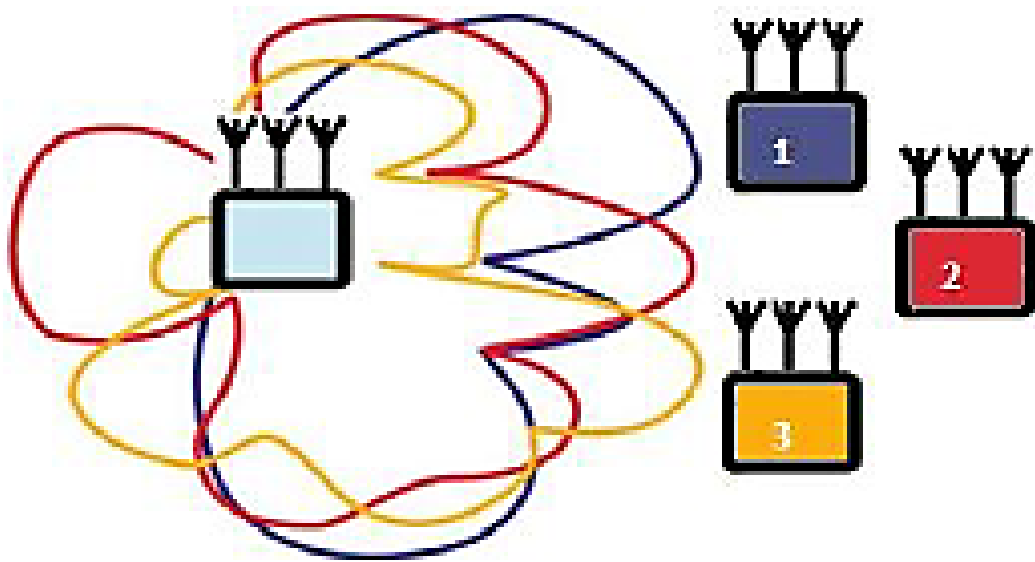


Рисунок 2.6 – Механізм «нульового керування» в MU-MIMO

Кожен із абонентів 1, 2 та 3 приймає сильний сигнал, у незначній мірі пошкоджений накладанням сигналу від інших абонентів. Цей механізм називають "нульове управління", тобто. управління положенням нуля діаграми спрямованості антени.

Реалізація механізму «нульового управління» в MU-MIMO досить складна. Їй потребує дуже точних відомостей про характеристики бездротового каналу доступу до кожного абоненту. Ці відомості повинні постійно оновлюватись, оскільки характеристики радіоканалу змінюються з плином часу. Їх вимірювання і передача вимагають додаткових витрат.

MU-MIMO має недолік. Час, протягом якого канал зайнятий, визначається найповільнішим абонентом. Новий потік не може бути переданий жодним з абонентів, поки не будуть закінчені всі передачі в багатокористувацькій групі MU-MIMO. У разі значної відмінності в пропускній спроможності (або обсязі переданої інформації) станцій групи ефективність використання бездротового середовища буде низькою.

Технологія MU-MIMO потребує складної обробки сигналу, а, отже, дорогого обладнання (у тому числі, абонентського). Тому технологія MU-MIMO включена до стандарту 802.11ac як необов'язкова (додаткова).

2.2.3 Стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6)

Нова редакція стандарту безпроводних мереж IEEE 802.11ax спрямована на вирішення суттєвої задачі – підвищення швидкості обміну даними у місцях великого скупчення користувачів. Ця перевага стандарту, а також підвищена надійність передачі даних робить його ефективним для використання у промислових середовищах. Головні характеристики стандарту 802.11ax.

- працює в діапазонах частот 2.4 та 5 ГГц;
- підтримує частотні смуги з попередніх стандартів 20/40/80/160 МГц;
- підтримує роботу MIMO 8x8 та забезпечує одночасну передачу до 8 просторових потоків;
- підтримує у двох напрямках (DL і UL) (взаємодія з точкою доступу 802.11ax одночасно) роботу MU-MIMO;
- підтримка модуляції типів 512 та 1024QAM;
- оновлена схема передачі преамбули та повторної перевірки.

За рахунок повного застосування всіх механізмів у комбінації, стандарт 802.11ax теоретично зможе забезпечити швидкості передачі інформації до 10 Гбіт/с. Новації стандарту – застосування технології MU-MIMO і для висхідного потоку, тобто від користувача до точки доступу. Також для більш ефективного використання частотного діапазону і боротьби з частотноселективними завмираннями та інтерференцією, вперше застосовуватиметься множинний доступ з ортогональним частотним розділенням (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access – OFDMA) [4].

Стандарт IEEE 802.11ax особливо ефективний при створенні безпроводних мереж для стадіонів, аеропортів, промислових середовищ тощо, де багато точок доступу Wi-Fi працюють у порівняно невеликій області простору. Таке щільне розміщення безпроводних мереж характерне і для офісних чи житлових приміщень.

Завдяки технології OFDMA відбувається паралельний обмін даними з багатьма пристроями. Якщо кожен окремий користувач спільної безпроводної мережі здійснював за певною чергою обмін даними через маршрутизатор, то тепер всі підключені пристрої можуть безперервно і одночасно це робити.

Для Wi-Fi 6 характерна покращена робота у місцях з великою кількістю аналогічних мереж. Це забезпечує нововведена функція BSS Color. Суть функції - підписується кожен пакет даних цифровим підписом конкретної мережі. Тобто роутер/приймач може відрізнити пакети даних від сусідніх мереж і просто ігнорувати їх. Зниження впливу сусідніх мереж має місце навіть у тому випадку, коли вони працюють на однаковому каналі.

Завдяки функції TWT (Target Wake Time) забезпечується у Wi-Fi 6 енергоефективність. Кожен підключений до безпроводної мережі пристрій витрачає менше енергії. TWT аналізує діяльність всіх гаджетів, і якщо якийсь із них протягом певного часу не користується мережею, то його Wi-Fi приймач переходить у сплячий режим. Таким чином, ця функція дозволяє в кілька разів зменшити споживання енергії.

Удосконалений протокол безпеки WPA3 у поєднанні із системою обміну ключами SAE (Simultaneous Authentication of Equals) забезпечують більш високий рівень захисту даних, ніж попередники Wi-Fi 6.

Розглянемо докладніше зміни у стандарті IEEE 802.11ax, зокрема, зміни на фізичному рівні.

Параметри фізичного рівня, який використовується в 802.11ax, загалом близький до 802.11ac. У 802.11ax використовується також мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM) і підтримується робота в частотних каналах шириною 20, 40, 80, 80+80 та 160 МГц.

Специфікація визначає чотириразове збільшення числа піднесущих OFDM до 2048. Однак це призводить до істотних змін при роботі зі стандартом 802.11ax. Інтервал між піднесущими скорочено вчетверо при збереженні існуючих смуг пропускання каналу, рисунок 2.7.

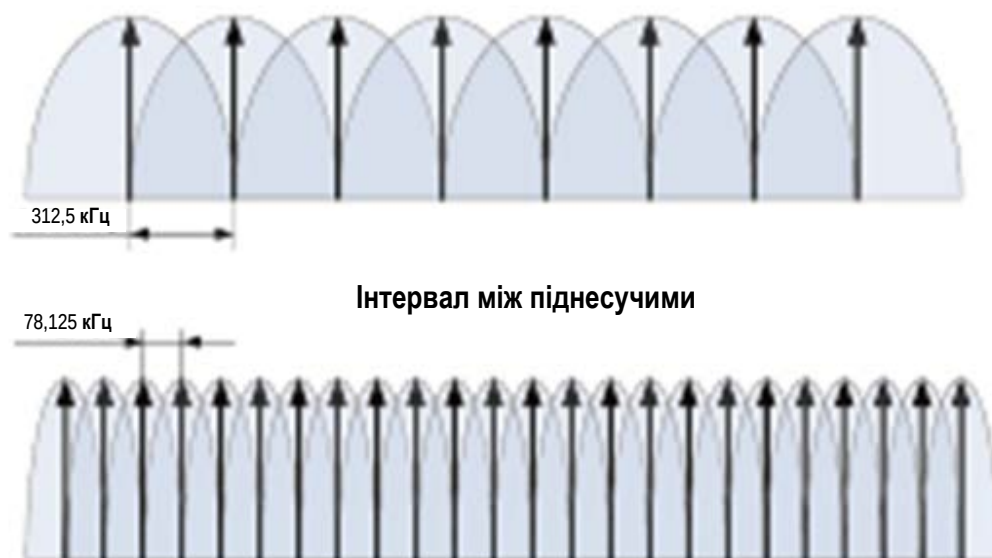


Рисунок 2.7 – Зміна інтервалу між несущими OFDM-сигналу в стандарті 802.11ax

Як уже зазначалось, у 802.11ax використовується множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA). Використовується збільшена кількість піднесущих, рис. 2.7. Для забезпечення кращої ортогональності при використанні технології OFDMA, тривалість OFDM-символів для передачі

блоку даних збільшено вчетверо і вона становить 12,8 мкс замість для 3,2 мкс [4] у попередніх версіях. Надійність багатокористувацької передачі у висхідному каналі зростатиме, оскільки у разі збільшення джиттера через неточну синхронізацію пристроїв різних користувачів, при збільшеній тривалості символу ймовірність помилок зменшується.

У стандарті 802.11ax для зменшення міжсимвольної інтерференції передбачено збільшення захисного інтервалу (Guard Interval, GI) між OFDM-символами. Це забезпечує більш стійкий зв'язок у приміщеннях та у змішаних середовищах – приміщення/вулиця. Передбачено три варіанти тривалості захисного інтервалу: стандартний 0,8 мкс, та збільшені: 1.6 та 3.2 мкс (для збільшення швидкості передачі інформації передбачена також можливість формувати укорочений захисний інтервал тривалістю 0.4 мкс) [5].

У попередньому стандарті 802.11ac у мережах Wi-Fi 5 вперше з'явилася можливість здійснювати одночасну передачу різних даних точкою доступу різними користувачам. Ця технологія отримала назва DL MU MIMO. Для передачі використовується просторове мультиплексування. Технологія базується на особливостях поширення радіосигналу. Завдяки їй можна значно збільшити сумарну пропускну здатність, якщо виконувати передачу кількох просторових потоків у різних напрямках замість передачі кількох просторових потоків одному користувачу (технологія MIMO). У додатку 802.11ax зроблено черговий крок розвитку мереж Wi-Fi у цьому напрямку та запропоновано вирішити складнішу задачу – організувати просторове мультиплексування в висхідному каналі (UL MU MIMO).

Однією з основних переваг стандарту 802.11ax є збільшення пропускну здатності в місцях з щільним розміщенням точок доступу для користувачів у 4 рази. Пояснення цьому, що всі пристрої 802.11ax підтримують роботу по низхідній лінії зв'язку Uplink MU-MIMO та MU-OFDMA. При цьому збільшується число одночасно підключених користувачів.

Для підвищення продуктивності мереж Wi-Fi із щільним розміщенням точок доступу стандарт 802.11ax використовує низку методів, які підвищують

ефективність використання каналних ресурсів мережами з областями радіовидимості, що перекриваються.

У мережах Wi-Fi кожен користувач, щоб визначити, чи вільне середовище, прослуховує його. У разі успішного декодування преамбули пакета користувач вважає середовище зайнятим протягом зазначеної тривалості передачі пакета. Також середовище вважається зайнятим, якщо користувач встановлює наявність шуму в каналі по його рівню на виході детектора, причому потужність перевищує поріг чутливості не менше ніж на 20 дБм.

У стандартах Wi-Fi введено поняття механізму NAV - віртуальної зайнятості середовища. NAV можна представити як лічильник, значення коду в якому зменшується в часі від певного значення до нуля. Якщо значення коду дорівнює нулю, то канал вільний, інакше – зайнятий. Значення коду лічильника змінюється при отриманні кадрів. Заголовок кадру, що генерується протоколом каналного рівня, містить поле Duration, в якому вказується запланована тривалість наступних кадрів (значення NAV). Отримавши черговий пакет, станція оновлює NAV, якщо значення Duration у цьому кадрі перевищує поточне значення NAV. Значення NAV може бути скинуто раніше часу при отриманні кадру CF-End.

Тут наведено певну низку переваг стандарту IEEE 802.11 ах. Зазначимо, що всі переваги Wi-Fi 6 можуть бути реалізовані тільки при використанні обладнання, що його підтримує. Але навіть пристрої попередніх поколінь, що підтримують попередні стандарти 802.11ac та 802.11n, в мережах 802.11ax працюватимуть більш ефективно.

2.2.4 Стандарт 802.11ah (Wi-Fi HaLow)

Цей стандарт з'явився тому, що прийшло розуміння того, що необхідно задовільнити вимоги щодо збільшення робочих відстаней і одночасно наднизького енергоспоживання. Це вимоги «Інтернету речей», а також специфічних промислових умов. Протокол Wi-Fi HaLow заповнює ці

прогалини, надаючи бездротове рішення з наднизьким енергоспоживанням, яке підключає безліч пристроїв на набагато більших відстанях і з меншим енергоспоживанням, ніж традиційний Wi-Fi.

Wi-Fi HaLow - це малопотужна, далекобійна і більш універсальна версія Wi-Fi, що працює в неліцензійному спектрі частот, що лежить нижче частоти 1 ГГц (конкретна частота залежить від країни та регіону; Європа використовує діапазон частот 863-868 МГц). Це оптимальний протокол для безпроводних пристроїв з живленням від батареї завдяки унікальному поєднанню у стандарті енергоефективності, можливості підключення на великі відстані, низької затримки, швидкості передачі даних з якістю HD-відео, функцій безпеки та вбудованої підтримки IP.

Таблиця 2.6 демонструє основні відмінності Wi-Fi HaLow від стандартів традиційних.

Таблиця 2.6 – Основні відмінності стандартів

Функціональна особливість	Wi-Fi 4/5/6 (IEEE 802.11n/ac/ax)	Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah)
Діапазони робочих частот	2, 4, 5, 6 МГц	Субдіапазон 1 ГГц
Вибір ширини каналу	20, 40, 80, 160 МГц	1, 2, 4, 8, 16(опціонально) МГц
Максимальна кількість адресних станцій на точку доступу	2007	8191
Однопоточковий діапазон швидкостей передачі даних MCS	6,5-150 Мбіт/с (802.11n, Wi-Fi 4)	150 кбіт/с – 86,7 Мбіт/с
Покращення бюджету каналу (канал 1 МГц)	-	15-24 дБм
Типовий радіус покриття	Приблизно 100 м	Більше 1 км, що у 10 разів більше від дальності дії (порівняно з 802.11n при 20 МГц). У 1000 разів більша площа, у 1000 разів більший обсяг передачі даних (порівняно з 802.11n при 20 МГц)

Низьке енергоспоживання. Визначені стандартом IEEE 802.11ah різні складні режими сну дозволяють пристроям HaLow залишатися в станах з дуже низьким енергоспоживанням протягом тривалих періодів часу, зберігаючи при цьому енергію батареї:

- Target wake time (TWT) — цільовий час пробудження. Встановлюється заздалегідь для станції та точки доступу час, коли «спляча» STA прокидатиметься і прислухатиметься до сигналів маяків.

- Extended maximum basic service set (BSS) – режим збільшує допустимий період простою STA до п'яти років, розширений максимальний набір базових послуг у режимі очікування.

- Short MAC headers – короткі заголовки MAC: ця опція скорочує час в ефірі та енергоспоживання, накладні витрати заголовка, звільняє спектр.

- BSS coloring — забарвлення BSS: STA може ігнорувати інші кольори, а реагувати лише на надані, які вказують групи BSS для конкретної точки доступу.

- Bidirectional TXOP (BDT) — двонаправлений TXOP: ця опція зменшує кількість звернень до середовища передачі, коли STA прокидається, щоб виявити наявність кадрів висхідного та низхідного каналів передачі.

Ефективні режими управління живленням та сну протоколу IEEE 802.11ah забезпечують багаторічну роботу батареї. Вузькосмугові сигнали протоколу IEEE 802.11ah на частоті біля 1 ГГц проходять більші відстані і з меншим енергоспоживанням, що дозволяє передавати більше бітів на одиницю енергії, ніж протоколи традиційного Wi-Fi у діапазонах 2,4 та 5 ГГц.

З таблиці 2.6 видно, що сигнали Wi-Fi HaLow використовують більш вузькі канали порівняно з найбільш вузьким каналом 20 МГц, що призначений для традиційного Wi-Fi. Це 20-кратне масштабування коефіцієнта ширини смуги каналу призводить до збільшення можливостей каналу на 13 дБ. У порівнянні з традиційним Wi-Fi (частота 2,4 ГГц) частоти, що лежать між 750 і 950 МГц забезпечують додаткові 8-9 дБ бюджету лінії зв'язку, що пов'язано зі зниженням згасання при їх поширенні в вільному просторі. Оптимізована за

діапазоном схему модуляції та нові методи кодування (MCS10) у протоколі Wi-Fi HaLow додатково забезпечує збільшення бюджету каналу ще на 3 дБ.

Більша зона покриття. Загалом Wi-Fi HaLow забезпечує покращення бюджету каналу до 24 дБ, якщо його порівнювати з традиційним 2,4 ГГц IEEE 802.11n (Wi-Fi 4). Перевага бюджету (за частотною ознакою та шириною смуги пропускання) каналу зв'язку HaLow ще більша, якщо порівняння вести з Wi-Fi 5 та Wi-Fi 6/6E, які використовують 5 та 6 ГГц. Wi-Fi HaLow поширюються вдесятеро далі, ніж традиційний Wi-Fi без використання мережних ретрансляторів-розширювачів.

Краще проникнення сигналу. Існує загальне правило: чим нижча частота, тим краще вона проникає крізь перешкоди і тим далі поширюється електромагнітна хвиля. У порівнянні з діапазоном частот традиційного Wi-Fi сигнали Wi-Fi HaLow із частотою менше 1 ГГц проходять крізь різні перешкоди значно легше. Розмаїття будівельних матеріалів і планувань будинків та комерційних будівель також менш впливає на сигнали HaLow, ніж на сигнали стандартів Wi-Fi в діапазонах 2,4 і 5 ГГц.

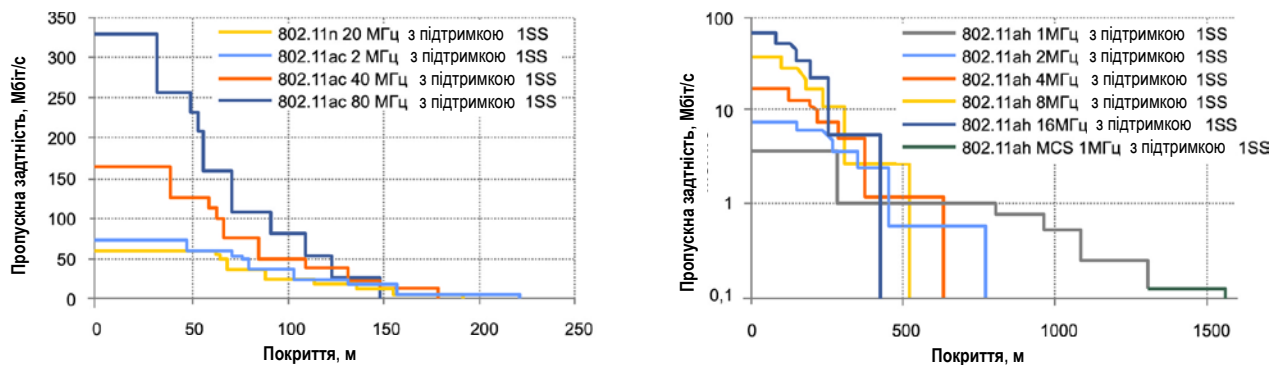


Рисунок 2.8 – Порівняння пропускну здатності 802.11n/ac (ліворуч) і 802.11ah (праворуч) залежно від дальності дії

Для корекції відбиття та усунення проблем багатопроменевого прийому Wi-Fi HaLow традиційно використовує модуляцію на основі ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (технологія OFDM). Відомо, що ця технологія ефективно усуває наслідки багатопроменевого поширення хвиль,

тому сприяє, очевидно, більш вільному розміщенню точок доступу (роутерів), у тому числі всередині приміщень або ззовні. На рисунку 2.8 наведені графіки пропускної здатності, як функції відстані, для традиційних Wi-Fi та для Wi-Fi HaLow. Різниця в графіках пояснюється зазначеним вище різним ступенем проникнення сигналу, що є наслідком значення використаної частоти.

Масштабування. Одна точка доступу Wi-Fi HaLow може адресувати до 8191 пристрою, що більш ніж у чотири рази перевищує можливості традиційної точки доступу Wi-Fi. Як і у випадку з традиційним Wi-Fi, HaLow може автоматично масштабувати смугу пропускання залежно від цілісності сигналу та відстані від точки доступу. Певні значення індексу модуляції та кодування підтримують пропускну здатність 150 кбіт/с - 40 Мбіт/с для однопоточних продуктів з однією антеною та з використанням ширини каналу 1-8 МГц. 80 Мбіт/с - якщо використовується додатковий канал зі смугою пропускання 16 МГц.

Топологія мережі Wi-Fi HaLow «зірка». Це широке покриття, хороша проникність та величезна ємність. Вони в сукупності дозволяють відмовитися від складних у розгортанні мереж та розширюють можливості підключення.

Як протокол великої дальності, Wi-Fi HaLow підтримує зони обслуговування за межами досяжності Wi-Fi 2,4 і 5 ГГц і не лише всередині, але й поза приміщеннями. Інші потенційні варіанти використання — великі громадські місця, спортивні арени, торгові та конференц-центри, де одна точка доступу Wi-Fi HaLow може замінити багато традиційних точок доступу Wi-Fi, усуваючи багато проблем, пов'язаних з ними. З урахуванням цього перевантаження мережі, обмеження діапазону та велике енергоспоживання традиційного Wi-Fi уже не можуть сприйматися як нездоланні перешкоди. Отже, Wi-Fi HaLow виділяється серед традиційних протоколів 802.11 своєю розширеною зоною дії, енергоефективністю, ємністю та універсальністю.

2.2.5 Стандарт 802.11s (Wi-Fi Mesh)

Стандарт IEEE 802.11s націлений, перш за все, на оптимізацію маршрутів у мережах з безпроводною комірчастою топологією, а також на інтегрування можливостей безпроводних комірчастих мереж (WMN — Wireless Mesh Networks) у існуючих мережах 802.11 на MAC рівні [4]. Тому, основними цілями стандарту 802.11s є:

- створення безпроводної системи розподілу (wireless distribution system) з автоматичним оновленням топології та конфігурацією шляху/маршруту;
- створення мереж невеликих розмірів (близько 32 вузлів);
- здійснення динамічної маршрутизації з можливістю передачі даних по одному, або безлічі маршрутів (broadcast і unicast пакети);
- забезпечення подальшої розширюваності мережі;
- забезпечення сумісності з протоколами вищого рівня.

Структура мережі WMN з урахуванням стандарту 802.11s зображена на рисунку 2.9. Вона складається з чотирьох класів пристроїв [2]:

1. Mesh Point (MP) - вузол комірчастої мережі, що виконує функції маршрутизації та передачі пакетів по комірчастій топології.

2. Mesh Access Point (MAP) - вузол комірчастої мережі з функцією точки доступу (AP), що дозволяє різним безпроводним пристроям, що підтримують стандарт 802.11, підключатися до WMN.

3. Mesh Portal (MPP) - граничний вузол мережі (шлюз), який дозволяє зв'язати комірчасту мережу з зовнішньою провідною або безпроводною мережею (External Network).

4. Stations (STA) - безпроводні пристрої з підтримкою стандарту 802.11, які підключаються до вузла MAP.

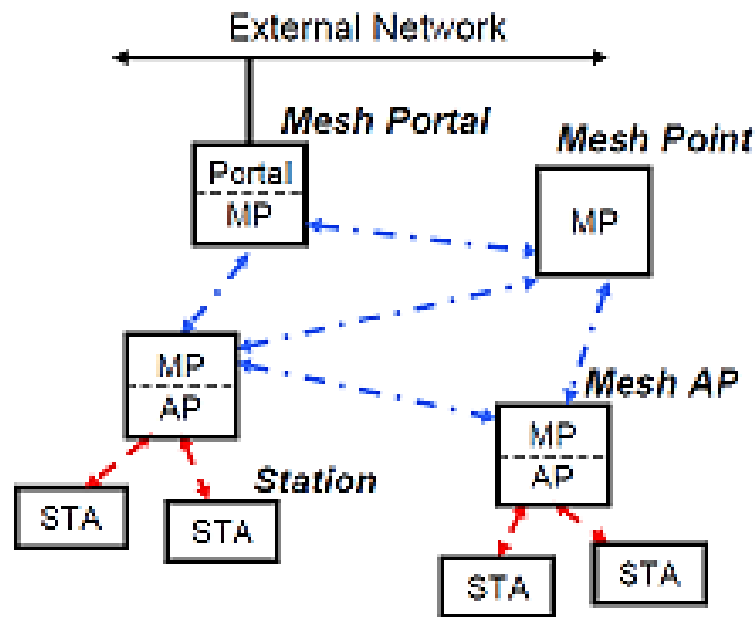


Рисунок 2.9 – Архітектура WMN мережі на базі 802.11s

У існуючих мережах стандарту 802.11 (абонентські, кінцеві) станції (STA) пов'язані з точками доступу AP і взаємодіють лише з ними. AP мають вихід до інших мереж (наприклад, Ethernet), але не можуть обмінюватися інформацією одна з одною. У mesh-мережі, рисунок 2.9, крім термінальних станцій та точок доступу, присутні особливі пристрої – вузли mesh-мережі (Mesh Point - MP). Ці вузли можуть взаємодіяти один з одним і підтримувати mesh-служби. Тому mesh-мережа функціонально еквівалентна ширококомовній Ethernet-мережі, всі вузли якої з'єднані на каналному рівні.

Зазначимо, що зміни у стандарті IEEE 802.11s практично не торкаються фізичного рівня. Всі нововведення відносяться до MAC-підрівню каналного рівня. Крім того, у стандарті 802.11s розглядаються питання маршрутизації пакетів в рамках mesh-мережі – це виходить за початкові рамки IEEE 802.11. Питання маршрутизації пакетів у mesh-мережах важливе.

MDA-резервування.

Детермінований доступ до mesh-мережі (Mesh Deterministic Access – MDA) – це опціональний механізм, що дозволяє отримувати доступ до середовища в заздалегідь зарезервовані часові інтервали. Це знижує конкуренцію доступу до середовища передачі, що істотно збільшує ймовірність

своєчасної доставки даних, чутливих до затримок (аудіо- та відеопотоки, дані з високим пріоритетом тощо).

MDA-з'єднання можливе тільки між станціями, які підтримують цей механізм. MDA-резервування задає інтервали, протягом яких MDA-станції не намагаються передавати пакети, щоб не заважати передачі даних по зарезервованому каналу.

При встановленні MDA-з'єднання вузол направляє запит вузлу-адресату, вказавши, коли і якої довжини інтервали він хоче використати. Одержувач запиту виконує аналогічні перевірки про допустимість створення з'єднання із запрошеними параметрами і посилає відповідь - позитивний або негативний. Якщо вибрані вузлом-джерелом часові інтервали перетинаються з іншими MDA-з'єднаннями, відомими одержувачу, він може запропонувати альтернативні інтервали часу. Для розриву MDA-з'єднання отримувач або відправник надсилають спеціальні інформаційні елементи (MDAOP Set Teardown information element).

Всі пристрої, які знають про існування MDA-резервування, зобов'язані періодично повідомляти про них своїм сусідам (рекламувати) за допомогою або інформаційних елементів MDAOP Advertisements information element, включених в керуючі пакети - бікони, або використовуючи спеціальні службові кадри MDA action frame. MDA-вузли зберігають список усіх резервувань, про які дізнаються з рекламних повідомлень та у яких беруть участь самі.

Синхронізація та бікони в IEEE 802.11s.

Стандарт IEEE 802.11 підтримує два режими роботи мережі: hot spot та ad hoc [3]. У режимі hot spot одна із станцій служить точкою доступу, і дані передаються тільки між нею та іншими станціями мережі. У режимі ad hoc передача можлива між будь-якими двома станціями.

У режимі hot spot точка доступу регулярно розсилає спеціальні кадри - бікони (beacon), головне призначення яких – синхронізація годинників станцій та інформування про сервіси та режими роботи точки доступу. Бікони містять спеціальне поле Timestamp, в якому записано час, коли перший біт бікона

виявляється переданим через радіоінтерфейс. Timestamp використовується при синхронізації годинників всіх станцій [4]. Це важливо як для фізичного, так і для канального рівнів. Так, у режимі модуляції з розширенням спектру методом частотних стрибків (FHSS) необхідно гарантувати, що перемикання всіх станцій на нову частоту відбувається одночасно. Також синхронізація важлива для режиму енергозбереження.

У режимі ad hoc бікони виконують ту саму функцію, що і в hot spot. Але процес передачі бікона є розподіленим, тобто у ньому беруть участь усі станції. Можна передавати тільки бікони або АТІМ-кадри - використовується механізм енергозбереження.

Передача бікона заснована на тому ж механізмі конкурентного доступу з контролем несущої, що і при передаванні даних. У момент ТВТТ кожна зі станцій заморожує лічильник часу відстрочення передачі даних та ініціалізує таймер передачі бікона випадково обраним числом слотів (одиниця дискретного часу в мережі 802.11), рівномірно розподіленим в інтервалі від нуля до якоїсь константи ($2 \cdot aCW_{min}$). Якщо середовище передачі не зайняте протягом слота, станція декрементує лічильник таймера. Якщо одна зі станцій починає передачу, інші станції заморожують свої таймери на час передачі плюс інтервал DIFS. При колізії (спробі одночасної передачі декількома станціями) замість DIFS використовується більш довгий інтервал EIFS. Станція починає передачу бікона, коли значення її таймера стає рівним нулю. Всі станції скасовують передачу своїх біконів, якщо є факт отримання бікона від будь-якої зі станцій.

Енергозбереження в IEEE 802.11s.

MAP-вузли завжди активні, оскільки будь-якої миті до них можуть звернутися пристрої, що не підтримують 802.11s та режим енергозбереження. Однак для пристроїв з автономним живленням (різного роду датчики, ноутбуки, телефони тощо) збереження енергії – актуальне завдання.

Вузли мережі зобов'язані повідомляти про свою здатність підтримати енергозберігаючий режим. Для цього використовується інформаційне поле

можливостей (capability information field) у біконах та у відповідях на пробні пакети. Не передбачено перехід з активного режиму в режим енергозбереження (і навпаки), поки не будуть проінформовані про бажання переключитися всі пристрої, з якими у нього встановлено з'єднання. Для інформування сусідів про зміну режиму енергозбереження використовуються порожні пакети даних (null-data frame).

Маршрутизація у мережах 802.11s.

Існують три основні типи протоколів маршрутизації, які можуть бути використані в WMN: реактивні, проактивні та гібридні [4]. Основна відмінність між ними полягає у часі встановлення шляху/маршруту між двома вузлами. У протоколах із реактивним режимом маршрутизації, шлях до вузла призначення встановлюється у момент необхідності передачі даних, тоді як у проактивних протоколах, маршрути практично до всіх вузлів вже закладені і є у маршрутній таблиці. Гібридні протоколи, такі як HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol - про нього докладніше буде сказано нижче) вміють працювати в обох режимах - реактивному та проактивному.

Очевидно, що ці режими мають свої переваги та недоліки. Проактивні протоколи можуть забезпечити мінімальний час встановлення маршруту, але вимагають наявності певних обчислювальних ресурсів та, крім того, можуть навантажувати всю мережу службовими пакетами. Реактивні протоколи можуть бути використані у мережах з динамічною топологією. Вони використовують менше обчислювальних ресурсів, але вимагають більше часу на встановлення маршруту.

Тому, в мережах WMN з відносно стабільною топологією порівняно з класичними ad-hoc мережами, більш привабливо виглядають проактивні (RA-OLSR) та гібридні (HWMP) протоколи маршрутизації [7].

Метрики та профілі.

У стандарті використовують механізм профілів. Він необхідний для забезпечення сумісності пристроїв з різними технологіями від різних виробників. Формат профілю має такий вигляд: {ідентифікатор профілю;

ідентифікатор протоколу маршрутизації; ідентифікатор метрики}. Обов'язковим є використання протоколу маршрутизації HWMP та метрики Airtime Link Metric [7]. Однак стандарт дає можливість виробникам використовувати інші протоколи та метрики, або розробляти свої оригінальні протоколи маршрутизації.

У якості Airtime Link Metric використовується час передачі пакета до сусіднього вузла, який обчислюється за формулою [7]:

$$C_d = \left(O \frac{B_t}{r} \right) \frac{1}{1-e_f}, \quad (2.1)$$

де O – константа, що визначає час доступу до каналу залежно від фізичної реалізації (802.11a, 802.11b);

B_t – число бітів у тестовому пакеті (8192);

r – швидкість передачі даних у каналі (Мбіт/с);

e_f – імовірність виникнення похибки у тестовому пакеті (вимірюється експериментально на пакетах довжиною B_t).

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

$$e_f = 1 - (1 - p_0)^n \approx np_0, \quad (2.2)$$

де p_0 – імовірність виникнення бітової помилки при передачі;

n — число біт, що передаються в пакеті.

Ця метрика є оцінкою часу передачі (у секундах) пробного пакета довжиною B_t з урахуванням можливих ретрансляцій при втратах у каналі. Спосіб визначення параметрів r та e_f у стандарті не наводиться, однак можна припустити, що для цього має використовуватись періодичне розсилання пробних пакетів завдовжки $B_t = 8192$ біт [4].

Протокол маршрутизації HWMP.

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

У реактивному режимі маршрутні таблиці створюються в mesh-вузлах безпосередньо перед передачею (на запит RREQ). Перед початком передачі вузол-відправник формує широкомовний запит Path Request (RREQ) до всіх сусідніх вузлів, які в свою чергу вносять необхідні зміни у поле метрики, і посилають даний запит далі. Вузол-одержувач приймає пакет RREQ з інформацією, що вже сформувалася, про метрику всього шляху, та формує пакет підтвердження Path Reply (RREP), який відсилає відправнику. Відправник, прийнявши пакет RREP, зчитує інформацію про метрику шляху та приймає рішення про початок процесу передачі, рисунок 2.10а.

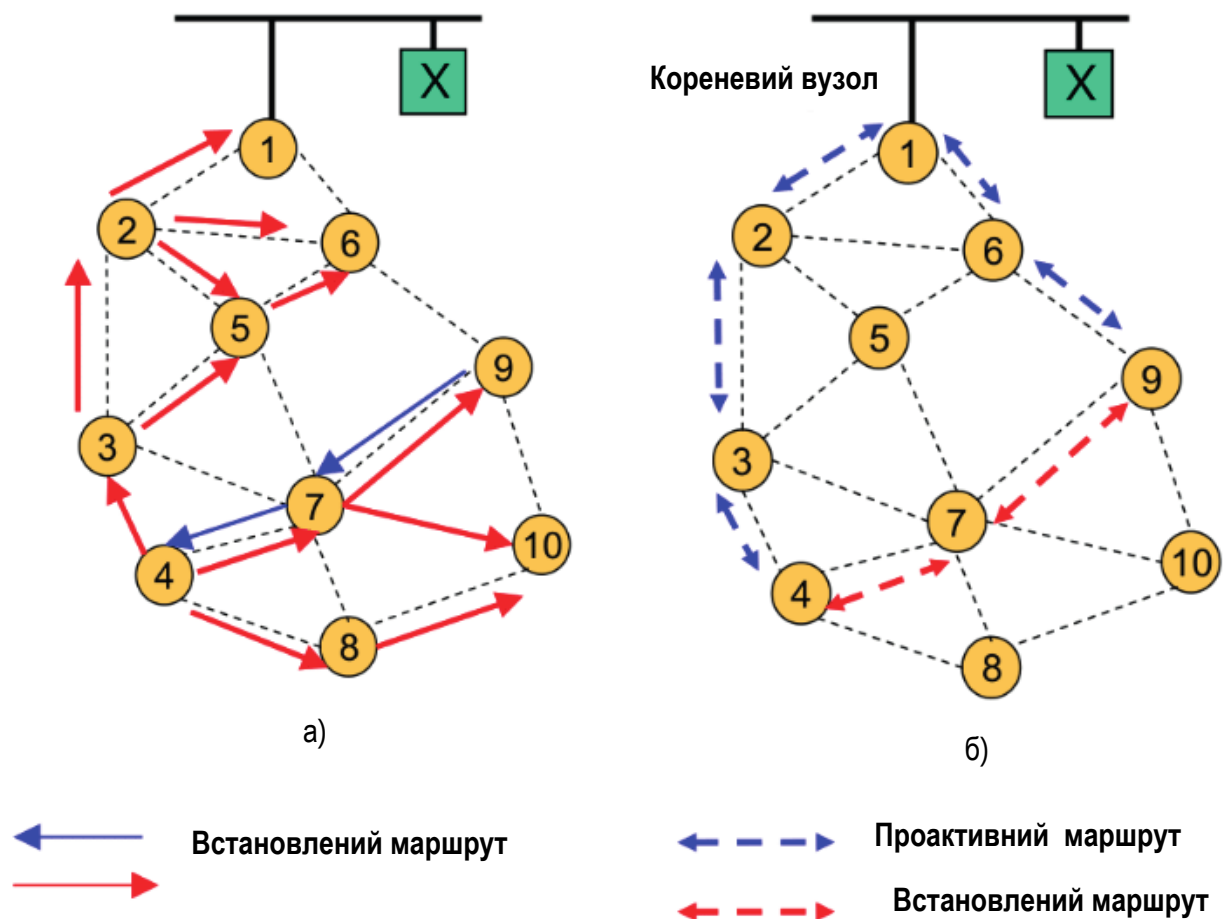


Рисунок 2.10 – Приклад побудови маршруту від вузла 4 до вузла 9 в реактивному (а) та проактивному (б) режимах

На відміну від реактивного режиму, де таблиця маршрутизації створюється в момент необхідності передачі інформації, проактивний режим передбачає наявність кореневого mesh-вузла. Цей кореневий вузол розсилає широкомовні запити RREQ, тим самим формуючи дерево шляхів з вершиною у кореновому вузлі. Таким чином, на момент необхідності передачі інформації, mesh-вузли вже мають таблицю маршрутизації, що дозволяє швидше встановити з'єднання із вузлом призначення, рисунок 2.10 б.

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

Принцип роботи промислового Wi-Fi мало чим відрізняється від звичайної безпроводної мережевої технології, яка забезпечує високошвидкісний доступ в інтернет за допомогою радіохвиль. Незважаючи на спільні принципи дії та основну архітектуру, різниця між стандартним та промисловим бездротовим рішенням таки існує. Вона полягає у виконанні пристроїв та підходів, орієнтованих на забезпечення стабільної роботи телекомунікаційного обладнання, а також на забезпечення безпеки та високої швидкості передачі даних у досить агресивному по відношенню до нього середовищі. Іншими словами, у випадку з Wi-Fi для промисловості змінюються завдання, насамперед підвищуються вимоги до надійності та захищеності бездротових промислових рішень [10].

Промислові безпроводні мережі передачі даних повинні використовувати спеціальне обладнання Wi-Fi, що забезпечує стабільне покриття великих відкритих територій, виробничих та складських приміщень. Створена бездротова мережа будь-якої конфігурації управляється з єдиного центру, а все залучене до мережі обладнання, у тому числі точки доступу та маршрутизатори, відрізняється промисловим виконанням із захистом від агресивних зовнішніх умов. Схема, зображена на рисунку 2.11, показує варіант архітектури промислової безпроводної мережі.

Промисловий Wi-Fi є безпроводною мережею передачі даних з самовідновлюваною і самоадаптованою структурою. Це означає, що при включенні кожен пристрій сам визначає стан сусідніх вузлів і починає виконувати свою роль у загальній топології. Якщо одна точка виходить з ладу, система автоматично перенаправляє дані по оптимальному маршруту без втрати у змісті, якості і часу. Така безпроводна промислова мережа передачі даних може застосовуватися на гірничодобувних підприємствах та промислових об'єктах. Комірчаста структура мережі - запорука високої стабільності роботи Wi-Fi.

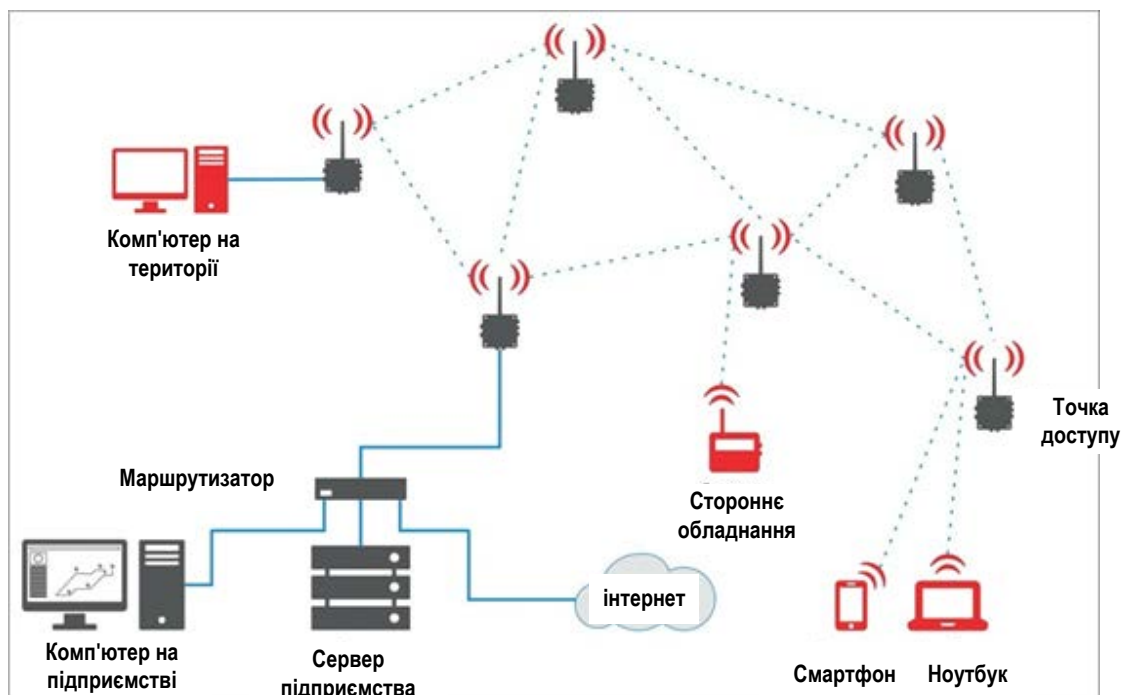


Рисунок 2.11 – Схема промислового Wi-Fi

Технологія Wi-Fi функціонує як підмережа мережі рівня підприємства. Вона являє собою мережу із зіркоподібною топологією, в центрі якої знаходиться точка бездротового доступу (WAP) і довільна кількість вузлів, кожен з яких підключений до WAP через цифрову приймально-передавальну установку.

Коли термінальне обладнання даних, наприклад, кишеньковий ПК виявляється на території охоплення WAP, відбувається спроба його підключення до безпроводної мережі. Мережі можуть бути захищеними

(підключення можливе лише для термінального обладнання даних, що має код аутентифікації) або відкритими (підключення можливе для будь-якого термінального обладнання даних). Залежно від умов зв'язок може бути надійним у межах приблизно 30 метрів від WAP у приміщенні та дещо більше поза приміщенням.

Спеціальні функції забезпечують роботу пристроїв введення-виводу. Наприклад, функція PCF використовує детермінований режим безпроводного зв'язку шляхом опитування, тобто точка доступу проводить аналіз клієнтів через певні проміжки часу.

Антенні технології, у тому числі радіочастотні коаксіальні кабелі, можуть встановлювати зв'язок з об'єктами, що рухаються маршрутом. Завод Volkswagen в місті Емден, Німеччина, застосовує коаксіальний радіочастотний кабель для важливих середовищ з радіосистемами, наприклад, на мобільних сервісних станціях. Клієнтське термінальне обладнання даних здійснює надійний зв'язок із системою контролю заводу та станцією обслуговування конвеєрної лінії.

Як правило, перед початком робіт з побудови безпроводної мережі вважається за необхідне проведення радіообстеження, але проведення радіообстеження доцільно та ефективно тільки в тому випадку, коли ми плануємо мережу на вже готовому об'єкті із встановленими конструкціями, що створюють перешкоди (стелажі, товари та обладнання із вмістом металу тощо). Якщо робити радіообстеження в порожньому приміщенні, його результати до встановлення стелажів і після можуть відрізнятися дуже істотно, що робить результати радіообстеження в порожньому приміщенні дуже умовними. Тому більш ефективно використання точок доступ до зовнішніх спрямованих антен, які встановлюються між рядами стелажів. Використання спрямованих антен дозволяє зробити сигнал більш стійким, збільшити відстань між точками, скоротити кількість точок доступу, а як наслідок – заощадити на кількості ліцензій для безпроводного контролера.

Другим важливим аспектом планування бездротової мережі на підприємстві є технологія підключення точок доступу та якість використовуваних матеріалів. Враховуючи, що будь-яке промислове підприємство є об'єктом з великою кількістю обладнання, яке може створювати радіоперешкоди, оптимальним варіантом буде побудова мережі з використанням екранованого кабелю, що дозволить зменшити вплив зовнішніх факторів під час передачі сигналу до точки доступу.

В даний час Wi-Fi є основою комунікацій, він витісняє традиційний дротовий Ethernet навіть у вузлах з активним інтернет-трафіком. Захист мережі - не найскладніше завдання, проте він вимагає особливої відповідальності від тих, хто здійснює встановлення обладнання. Ранні мережі Wi-Fi користувалися системою безпеки на основі алгоритму WEP (Wired Equivalent Privacy), який включили до стандарту IEEE 802.11, і тоді він був націлений на широкий споживчий ринок.

Спочатку цього було цілком достатньо, щоб ніхто не увійшов до вашої домашньої мережі. У 2003 р. з'явився захист мереж Wi-Fi за допомогою алгоритму WPA. З'явилися покращення. Згодом ці протоколи були зламані. З 2006 р. запроваджується WPA2. Стосовно цього протоколу було доведено можливість злому, хоча це вже вимагало надто багато часу та зусиль.

Хакери намагаються проникнути в мережу підприємства, використовуючи найуразливіші місця. Основною проблемою для них є можливість наблизитися до джерела радіосигналу Wi-Fi. Найбільша небезпека - коли через виробничу мережу буде отримано доступ до корпоративної мережі підприємства, де зберігаються найважливіші дані. Тому однією з найбільш важливих тем щодо кібербезпеки є необхідність захисту важливих даних на виробництві.

Звичайно ж, завжди першочерговим фактором є уважність та відповідальна поведінка персоналу підприємства. Але можна порекомендувати не нехтувати і такими діями [7-10]:

- заміна усіх маршрутизаторів, випущених до 2006 року, на сучасніші.

- налаштування всіх мереж на використання WPA2.
- використання складніших паролів.

Розглянемо ці заходи докладніше.

Маршрутизатори з роком випуску до 2006 р. все ще можуть добре працювати, але якщо вони не підтримують захищений доступ із використанням WPA2, то повинні бути замінені на новіші. Але і новий маршрутизатор слід перевірити наявність цієї опції. Критичним при створенні пароля є його довжина та різноманітність символів, включаючи цифри, використання літер верхнього та нижнього регістра тощо.

Таблиця 2.7 – 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

Управління пароллями - це серйозна справа. Тільки системний адміністратор конкретної мережі повинен знати всі паролі доступу. До його обов'язків входить негайна їх зміна (блокування), як тільки відповідний працівник звільняється.

Згадані заходи безпеки ефективні, прості у реалізації та недорогі. Персонал, відповідальний за Wi-Fi та інші мережі на підприємстві, повинен підтримувати відповідний рівень захисту мереж.

2.4 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: заводостійкі 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. Для трьох із них у вигляді таблиці наведені порівняльні характеристики.

	802.11n	802.11ac	802.11ax
Рік ратифікації	2009	2014	2017-2019
Робоча частота	2,4/5 ГГц	5 ГГц	2,4/5 ГГц
Частотні канали	20/40 МГц	20/40/80/160 МГц	20/40/80/160 МГц
Пікова фізична швидкість	600 Мбіт/с	6933 Мбіт/с	9608 Мбіт/с
Макс. кільк. SU-потоків	4	8	8
Макс. кільк. MU-потоків	-	4	8
Модуляція	OFDM	OFDM	OFDM OFDMA
Макс. тип і швидкість кодування	64- QAM, 5/6	256- QAM, 5/6	1024-QAM, 5/6
Макс. кільк. тонів OFDM	128	512	2048
Рознесення субтонів	312,5 кГц	312,5 кГц	78,125 кГц

Проаналізовано також технічні характеристики стандартів 802.11ah (Wi-Fi HaLow) та 802.11s (Wi-Fi Mesh). Перший з них задовольняє вимогам щодо збільшення робочих відстаней (більше 1 км) і одночасно наднизького енергоспоживання (робоча частота менше 1 ГГц), другий (IEEE 802.11s) - націлений на оптимізацію маршрутів у мережах з безпроводною комірчастою топологією, а також на інтегрування можливостей безпроводних комірчастих

мереж (WMN — Wireless Mesh Networks) у існуючих мережах 802.11 на MAC рівні.

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

У рамках стандарту 802.11s детально 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.

3 ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ПОКАЗНИКИ ФІЗИЧНОГО РІВНЯ

3.1 Ефективність та завадостійкість QAM-N модуляції

У попередньому розділі були проаналізовані стандарти Wi-Fi, які доцільно використовувати у промислових середовищах. В усіх них застосовано ортогональне частотне розділення з мультиплексуванням (OFDM або OFDMA), причому також в усіх – квадратурна амплітудна модуляція (QAM) на піднесуших. Позиційність QAM у різних стандартах різна, проте розглянемо важливі для зазначених у роботі умов функціонування параметри ефективності та завадостійкості.

Важливий висновок робіт Шеннона у тому, що з використанням коригувальних кодів можна створити систему зв'язку з нехтовно малою ймовірністю помилки на виході декодера каналу, якщо швидкість передачі інформації менша за пропускну здатність каналу. При цьому адекватна система без коригувального кодування буде більш дорогою та енергоємною і складною. Тобто ефективна система повинна мати можливість функціонувати в режимі з досить високою частотою помилок на вході декодера. Але декодований потік (після застосування коригувального коду) повинен мати вкрай малу ймовірність помилки на біт. Ефективність та завадостійкість QAM-N модуляції розглядається у контексті цього зауваження [3-4].

Якщо в інформаційний сигнал при кодуванні водяться надлишкові символи, то це супроводжується негативним ефектом – зниженням корисної швидкості передачі. Отже, для збереження швидкості передачі корисного навантаження необхідно підвищення кратності модуляції або розширення смуги частот каналу.

Отже, завадостійке кодування знижує ймовірність помилки, або енергетику передачі при тій же ймовірності помилки, або і те, і інше одночасно. Це означає, що кодування розширює можливості компромісу між смугою та енергетикою каналу, що стосується будь-якої системи зв'язку.

3.1.1 Спектральна ефективність

Ефективність модуляційної схеми характеризує власне спектральна (частотна) ефективність цифрової системи, оскільки цей показник визначається таким чином:

$$\gamma = R_b / B_W, \quad (3.1)$$

де R_b – інформаційна швидкість у каналі, біт/с; B_W – смуга пропускання, Гц.

Розмірність спектральної ефективності - біт/(с•Гц).

Доступна смуга частот каналу B_W у реальних умовах з тих чи інших міркувань може використовуватися не повністю. Тому навіть досить ефективну систему за цим критерієм оцінки слід визнати неефективною. Фактично модуляційна схема може оцінюватися через відповідне поєднання (3.1) швидкості передачі та ширини спектру модульованого сигналу. Це означає, що необхідно уточнити критерій спектральної ефективності, зв'язавши його зі смугою Найквіста B_N і коефіцієнтом заокруглення спектра α . Значення цього коефіцієнта характеризує розширення займаної спектром сигналу смуги частот каналу B_L понад смугу Найквіста B_N . Смуга Найквіста, як відомо, це діапазон частот, що лежить між першими «нулями» спектру сигналу. Отже

$$B_L = B_N(1 + \alpha). \quad (3.2)$$

З урахуванням цієї обставини реальна спектральна ефективність μ модуляційних схем, які працюють у цифровій системі передачі, може бути визначена:

$$\mu = R_b / B_L = R_b / B_N(1 + \alpha). \quad (3.3)$$

Якщо використовується вся смуга пропускання каналу, то має місце рівність $B_W = B_L$. За цієї умови показники ефективності μ і γ однакові, тобто виконується рівність $\mu = \gamma$.

Нехай у схемі модулятора відсутні формувальні фільтри Найквіста і має місце рівність $B_W = B_L$ та $\alpha = 0$. Власне, це критерій потенційної спектральної ефективності модуляційної схеми. Тоді потенційна ефективність становить [11]:

$$\gamma_0 = R_b / B_N. \quad (3.4)$$

Після перетворень

$$\mu = \gamma_0 / (1 + \alpha) \text{ або } \gamma_0 = \mu(1 + \alpha). \quad (3.5)$$

Для багатопозиційної цифрової модуляції, наприклад, QAM-N, при якій число N визначає кількість бітів $\log_2(N)$, які передає кожен символ, швидкість передачі інформації визначається

$$R_b = \log_2(N) R_s, \quad (3.6)$$

де R_s – швидкість передачі символів цифрового потоку; N – сумарне число точок на сузір'ї модуляційної схеми або кількість різновидів символів.

Максимальна швидкість передачі символів у каналі передачі згідно з критерієм Найквіста (ширина смуги B_W) дорівнює

$$R_s = B_W / (1 + \alpha). \quad (3.7)$$

Тому при $B_W = B_L$

$$\mu = \log_2(N) / (1 + \alpha). \quad (3.8)$$

Отже, для підвищення фактичної спектральної ефективності μ необхідно збільшувати крутість зрізу спектра модулюючого сигналу, зменшуючи значення коефіцієнта заокруглення спектра α , і одночасно збільшувати кратність модуляції (значення позиційності) $\log_2(N)$.

Зазначимо, що практичні значення спектральної ефективності не відповідають теоретично розрахованим. Модуляція QAM-64, наприклад, забезпечує передачу кожним символом 6 бітів інформації, що могло б визначати його спектральну ефективність. Реально маємо дещо менші цифри, на які впливає спосіб кодування. Саме спосіб кодування визначає кількість надлишкових бітів у структурі символу.

3.1.2 Енергетична ефективність

Формула для визначення показника енергетичної ефективності [3-5]

$$\beta = R_b N_0 / P_C, \quad (3.9)$$

де P_C – середня потужність модульованого сигналу; $N_0 = kT$ – одностороння спектральна щільність потужності адитивного білого гаусового шуму (АБГШ) на вході приймального фільтра.

Враховуючи, що

$$P_C = E_b R_b, \quad (3.10)$$

де E_b – енергія сигналу на вході приймального фільтра, яка припадає на біт інформації, отримуємо

$$\beta = N_0/E_b. \quad (3.11)$$

Видно, що коефіцієнт β – це відношення щільності шуму на вході приймача до енергії на біт інформації в сигналі, що передається.

При формуванні спектрів згідно з критеріями Найквіста та використанні у модемі узгодженої фільтрації енергетична ефективність β може бути визначена [5-6]:

$$\beta = R_b N_0 B_N / P_C B_N. \quad (3.12)$$

Для узгодженої фільтрації по Найквісту шумова смуга приймача дорівнює смузі Найквіста. Тоді потужність шуму на вході вирішувального пристрою дорівнює $P_{\text{ш}} = N_0 B_N$, відношення сигнал/шум $q = P_C / P_{\text{ш}}$, а $\beta = R_b / q B_N$.

Спектральна ефективність (μ) та енергетична ефективність (показник β) взаємопов'язані. Якщо у формулу для β підставити відношення $R_b / B_N = \gamma_0 = \mu(1 + \alpha)$, то отримуємо

$$\beta = \mu(1 + \alpha) / q. \quad (3.13)$$

$$q = \mu(1 + \alpha) / \beta. \quad (3.14)$$

Звернемося до формули Шеннона, яка визначає пропускну здатність частотно-обмеженого каналу з адитивним білим гауссівським шумом

$$C = \Delta F \log_2(1 + P_C / N_0 \Delta F). \quad (3.15)$$

У наведеній формулі смуга пропускання системи ΔF дорівнює смузі Найквіста B_N . Якщо виконується умова теореми, то пропускна здатність дорівнює бітовій швидкості, тобто $R_b = C$. Це дає можливість отримати вираз для верхньої межі енергетичної ефективності передачі інформації

$$R_b/B_N = \log_2(1 + q) = \log_2 \left[1 + \mu(1 + \alpha)/\beta \right], \quad (3.16)$$

$$\mu(1 + \alpha) = \log_2 \left[1 + \mu(1 + \alpha)/\beta \right]. \quad (3.17)$$

Тоді з урахуванням реальної спектральної ефективності μ і коефіцієнта заокруглення спектра α можна знайти енергетичну ефективність β

$$\beta = \frac{\mu(1+\alpha)}{(2^{\mu(1+\alpha)} - 1)}. \quad (3.18)$$

Видно, що енергетична ефективність зменшується при збільшенні спектральної ефективності μ та коефіцієнта заокруглення спектра α . Це означає, що енергії сигналу повинна бути більшою, якщо застосовуються модуляційні схеми з високим рівнем позиційності.

3.1.3 Завадостійкість квадратурної амплітудної модуляції

Важливо порівняти завадостійкість квадратурної амплітудної модуляції QAM-N та квадратурної фазової модуляції QPSK. Особливо це стосується високопозиційних схем квадратурної амплітудної модуляції.

У свою чергу QPSK демодуляцію зручно аналізувати на фоні BPSK демодуляції. При цьому зазначимо, що в QPSK потрібно використати дві ортогональні несущі, а не одну опорну несущу як для BPSK.

Для BPSK імовірність бітової похибки на виході приймального фільтра при впливі шуму на модульований сигнал визначається виразом [7]:

$$P_b = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \int_A^\infty e^{-\left(\frac{x^2}{2N}\right)} dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{A^2}{2N}} \right), \quad (3.19)$$

де A – амплітуда обвідної сигналу BPSK; N – потужність шуму.

Для узгодженого фільтра значення $\frac{A^2}{2N}$ стає рівним E_b/N_0 , досягнувши максимуму

$$\frac{A^2}{2N} = E_b/N_0, \quad (3.20)$$

де E_b – енергія, що припадає на один біт вхідного фазомодульованого сигналу.

Для когерентної QPSK-демодуляції процес еквівалентний когерентному BPSK-детектуванню, у якому рівень сигналу на 3 dB нижче, ніж у сигналу QPSK. При цьому вважається, що вхідний сигнал QPSK когерентно детектується парою ортогональних опорних несущих.

Для сигналу QPSK ймовірність помилки на біт

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{A^2}{4N}} \right). \quad (3.21)$$

Для узгодженої фільтрації у вхідному приймальному фільтрі діє рівність

$$\frac{A^2}{4N} = E_b/2N_0. \quad (3.22)$$

де E_b – енергія на вході приймального фільтра сигналу ФМ.

Оскільки символ сигналу QPSK на відміну від символу сигналу BPSK складається з 2 бітів, то $E_s = E_b$ для сигналу BPSK, і $E_s = 2E_b$ для сигналу QPSK. Отже, формули (3.20) та (3.22) чисельно рівні одна одній, і ймовірність помилки на біт при когерентному прийомі сигналу QPSK є функцією E_b/N_0 , як і для сигналу когерентної BPSK. Таким чином, модуляція QPSK забезпечує найкращий компроміс за критерієм потужність-смуha.

Сигнали ФМ мало чутливі до нелінійності каналу. Тому їх використовують в умовах з достатньо значним рівнем шуму.

На рисунку 3.1 наведена характеристика імовірності бітової похибки для QPSK-модуляції при когерентному детектуванні в залежності від співвідношення E_b/N_0 .

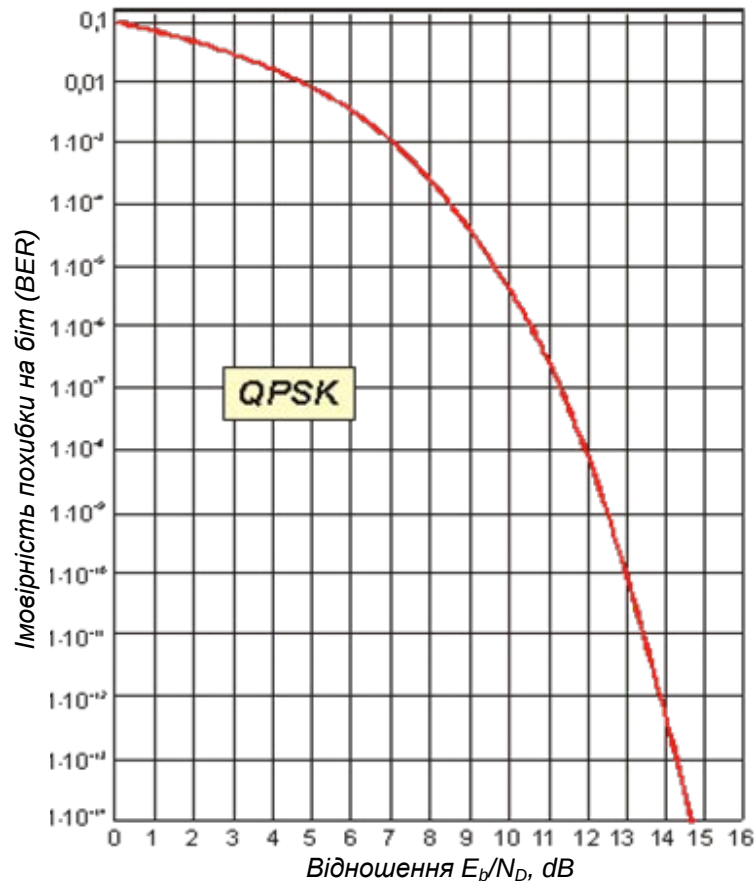


Рисунок 3.1 – Залежність імовірності бітової похибки для QPSK-модуляції від співвідношення E_b/N_0

Тепер розглянемо квадратурну амплітудну модуляцію.

Загальна формула для визначення імовірності похибки при прийомі символу для квадратурної амплітудної модуляції QAM-N має вигляд [5, 7]:

$$P_e = \frac{1}{\log_2(N)} \left\{ 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2(N) E_b}{2(N-1) N_0}} \right) \right] \right] \right\}. \quad (3.23)$$

На рисунку 3.2 наведені графіки потенційної завадостійкості модуляційних схем QAM-16 і QAM-64 як функції від відношення E_b/N_0 . Також наведена крива завадостійкості QPSK-модуляції.

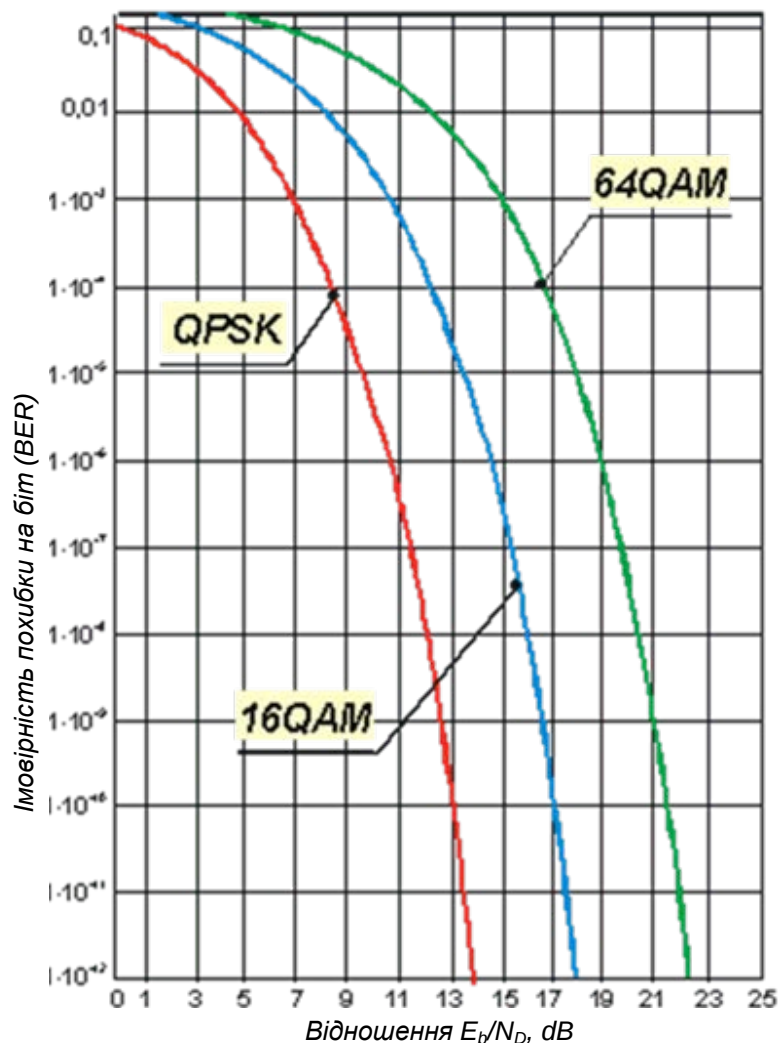


Рисунок 3.2 – Графіки потенційної завадостійкості найбільш поширених видів модуляції QAM-16 і QAM-64 як функції від відношення E_b/N_0

Можна використати у відношенні сигнал/шум C/N у знаменнику енергію шуму. Перерахунок відношення E_b/N_0 у C/N проводиться за формулою:

$$C/N = \frac{E_b}{N} = E_b/N_0 \log_2(N). \quad (3.24)$$

У цьому випадку криві завадостійкості отримують також за формулою (3.23) після підстановки у неї (3.24). Результати розрахунків наведені на рисунку 3.3 [7, 8].

Якщо врахувати завадостійке кодування, при якому має місце зниження енергії через введення у груповий потік додаткових бітів, то формула (3.24) прийме вигляд

$$C/N = E_b/N_0 \log_2(N) R, \quad (3.25)$$

де R – кодова швидкість.

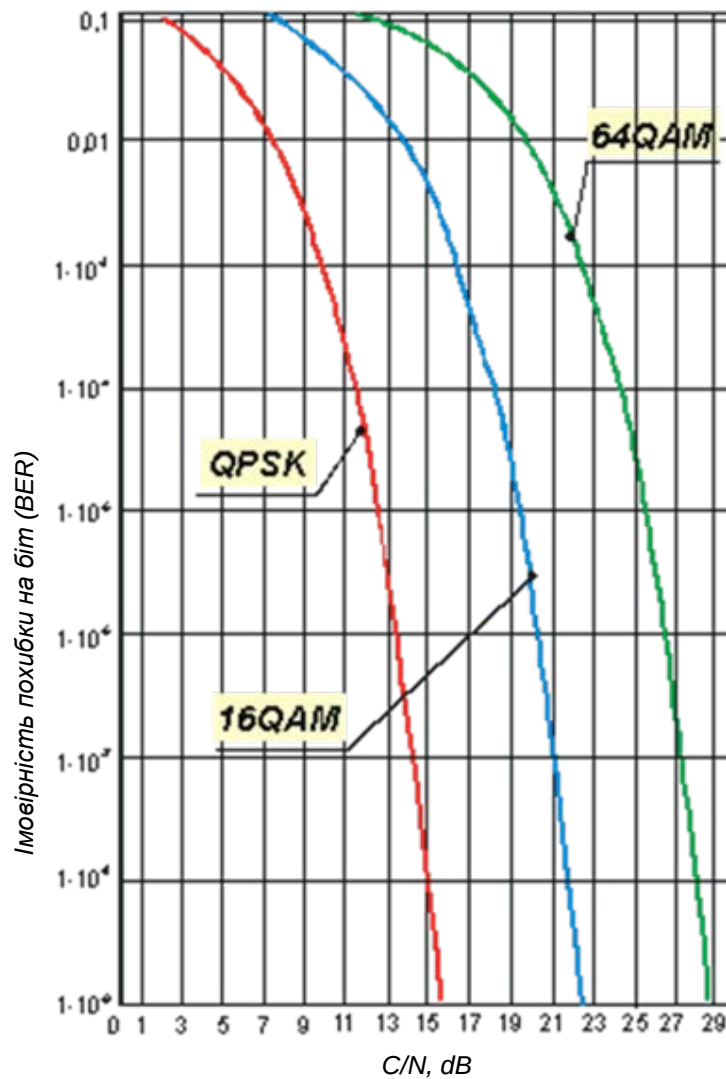


Рисунок 3.3 – Графіки завадостійкості модуляції QAM-16 і QAM-64 залежно від відношення C/N

Отже – найменш завадостійкою з наведених є модуляція QAM-64, що має найбільшу позиційність, тобто використовує найбільше різновидів символів.

3.2 Розрахунки радіоканалу передачі даних

3.2.1 Розрахунок згасання в антенно-фідерному тракті

Мова йде про антенно-фідерний тракт (АФТ), який з'єднує точку доступу мережі Wi-Fi та маршрутизатор, що розташовується в зоні сервера підприємства.

Втрати в АФТ складаються зі складових згасання: у кабелі, в роз'ємах, в додатковому антенно-фідерному обладнанні (розгалужувачі, узгоджувальні пристрої тощо).

Втрати визначаються за формулою:

$$W_{\text{АФТ}} = W_C L + W_{CC} N + W_{\text{Дод}}, \quad (3.26)$$

де W_C - погонне згасання сигналу в кабелі на робочій частоті, дБ/м;

L - довжина кабелю, м;

W_{CC} - втрати в роз'ємі, дБ;

N – кількість роз'ємів, шт;

$W_{\text{Дод}}$ – втрати у додатковому антенно-фідерному обладнанні, дБ.

У безпроводній мережі відсутній підсилювач та антенно-фідерний тракт складається лише з пасивних елементів (розрахунок ведеться для ланки мережі, для якої довжина кабелю не буде перевищувати 10 м). При більшій довжині кабелю доцільно використати лінійний підсилювач. Згасання на роз'ємі приймемо 0,4 дБ, погонне згасання кабелю 0,285 дБ/м, додаткові втрати 0,2 дБ.

За формулою (3.26) втрати в АФТ становлять:

$$W_{\text{АФТ}} = 0,285 \cdot 10 + 0,4 \cdot 3 + 0,2 = 4,25 \text{ дБ}.$$

3.2.2 Розрахунок ефективної ізотропно-випроміненої потужності

Ефективна ізотропно-випромінена потужність для точки доступу визначається за формулою

$$EIRP = P_{\text{прд}} - W_{\text{АФТ}} + G_{\text{прд}}, \quad (3.27)$$

де $P_{\text{прд}}$ – вихідна потужність передавача, дБм; $W_{\text{АФТ}}$ – втрати сигналу в АФТ, дБ; $G_{\text{прд}}$ – підсилення антени передавача, дБ.

Вихідні дані для розрахунку зведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку $EIRP$

Позначення	Найменування	Од. вим.	Значення
$P_{\text{прд}}$	Вихідна потужність передавача	дБм	20
$G_{\text{прд}}$	Коефіцієнт підсилення антени	дБ	14
$W_{\text{АФТ}}$	Втрати сигналу в АФТ	дБ	4,25

Результат розрахунку за формулою (3.27):

$$EIRP = 20 - 4,25 + 14 = 29,75 \text{ дБ.}$$

3.2.3 Розрахунок сумарного підсилення радіосистеми

Щоб визначити сумарне підсилення радіосистеми, необхідно знати такі параметри:

- вихідну потужність передавача;
- чутливість приймального тракту віддаленої точки;
- коефіцієнти підсилення антен передавача і приймача;
- коефіцієнти підсилення підсилювачів (за їх наявності);
- втрати сигналу в АФТ передавача та приймача.

Сумарне підсилення радіосистеми обчислюється за такою формулою:

$$G_{\text{сум}} = P_{\text{прд}} - P_{\text{прм}} + G_{\text{прд}} + G_{\text{прм}} - W_{\text{АФТ}}, \quad (3.28)$$

де $P_{\text{прд}}$ – вихідна потужність радіопередавача; $P_{\text{прм}}$ – чутливість приймача; $G_{\text{прд}}$ – підсилення антени передавача; $G_{\text{прм}}$ – підсилення антени приймача; $W_{\text{АФТ}}$ – втрати сигналу в АФТ.

Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Вихідні дані для розрахунку сумарного підсилення радіосистеми

Позначення	Найменування	Значення
$P_{\text{прд}}$	Вихідна потужність передавача	20
$P_{\text{прм}}$	Чутливість приймача	-72
$G_{\text{прд}}$	Підсилення антени передавача	14
$G_{\text{прм}}$	Підсилення антени приймача	14
$W_{\text{АФТ}}$	Втрати сигналу в АФТ	4,25

За формулою (3.28) отримаємо сумарне підсилення радіосистеми:

$$G_{\text{сум}} = 20 - (-72) + 14 + 14 - 4,25 = 115,75 \text{ дБм.}$$

3.2.4 Розрахунок дальності роботи безпроводного каналу зв'язку

Формула для розрахунку:

$$W_0 = 33 + 20(\lg F + \lg D), \quad (3.29)$$

де W_0 – втрати у вільному просторі; F – центральна частота каналу, на якому працює система зв'язку; D – відстань між двома точками, км.

Втрати у вільному просторі W_0 визначаються сумарним підсиленням системи (3.28) і обчислюються за формулою

$$W_0 = G_{\text{сум}} - \text{SOM}, \quad (3.30)$$

де SOM (System Operating Margin) – в енергетиці запас радіозв'язку, який враховує можливі фактори, які негативно впливають на дальність зв'язку. До них відносять:

- температурний дрейф чутливості приймача та вихідної потужності передавача;
- наявні атмосферні фактори: дощ, туман, сніг;
- неузгодженість з антенно-фідерним трактом передавача, антени, приймача.

Приймається параметр SOM зазвичай до 10 дБ. Вважається, що такий запас підсилення достатній для інженерного розрахунку.

$$W_0 = 115,75 - 10 = 105,75 \text{ дБ.}$$

Формула дальності зв'язку:

$$D = 10^{\left(\frac{W_0}{20} - \frac{33}{20} - \lg F\right)}. \quad (3.31)$$

За формулою (3.31) максимальна дальність роботи безпроводного каналу зв'язку складе:

$$D = 10^{\left(\frac{105,75}{20} - \frac{33}{20} - \lg 2400\right)} \approx 1,8 \text{ км.}$$

3.2.5 Розрахунок сумарних втрат радіосистеми

Розрахунок втрат у радіосистемі можна зробити, використовуючи формулу:

$$W_{\text{СУМ}} = W_{\text{АФТ}} + W_0, \quad (3.32)$$

де W_0 – втрати під час поширення радіохвиль, дБ.

$$W_0(D = 0,4) = 33 + 20(\lg 2400 + \lg 0,4) = 89 \text{ дБ.}$$

За формулою (3.32) сумарні втрати радіосистеми становлять:

$$W_{\text{сум}} = 4,25 + 89 = 93,25 \text{ дБ.}$$

3.2.6 Розрахунок енергетичного запасу радіоканалу

Сумарне підсилення радіоканалу має бути більшим сумарних втрат:

$$G_{\text{сум}} > W_{\text{сум}}. \quad (3.33)$$

Різниця між значеннями $G_{\text{сум}}$ і $W_{\text{сум}}$ визначає енергетичний запас радіоканалу:

$$Z = G_{\text{сум}} - W_{\text{сум}}. \quad (3.34)$$

Обчислення за формулою (3.34) дає

$$Z = 115,75 - 93,25 = 22,5 \text{ дБ.}$$

Отже, згасання в антенно-фідерному тракті незначне, що дає змогу отримати хороше сумарне підсилення; дальність системи достатня; енергетичний запас радіоканалу має місце, оскільки виконується умова (3.33).

3.3 Висновки до розділу

Розглянуто параметри ефективності та завадостійкості QAM-N модуляції. Визначено її потенційні характеристики та доцільність завадостійкого кодування в заданих умовах експлуатації.

Введення в інформаційний сигнал надлишкових символів приводить до зниження швидкості передачі корисного навантаження. Отже, для збереження

швидкості передачі корисного навантаження необхідно підвищення кратності модуляції або розширення смуги частот каналу.

Показано, що сигнали з квадратурною амплітудною модуляцією мають кращу завадостійкість, ніж фазомодульовані сигнали. Це підтверджується аналізом сузір'їв обох видів модуляції. Встановлено, що при однаковій нормованій потужності сигналу відстань між сигнальними точками в КАМ більша, ніж у ФМ.

Збільшення порядку модуляції пропорційно збільшує швидкість передачі інформації. Однак це збільшення швидкості передачі даних відбувається на шкоду завадостійкості. Менш стійкими до шумів і перешкод є схеми модуляції вищого рівня позиційності.

Виконано розрахунки радіоканалу передачі даних. Результати розрахунку показують, що згасання в антенно-фідерному тракті незначне, що дає змогу отримати хороше сумарне підсилення; дальність системи достатня; енергетичний запас радіоканалу має місце.

.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розвиток нашого суспільства ставить перед роботодавцями завдання максимізувати прибуток при мінімальних витратах. У такі періоди питання охорони праці, що визначає здоров'я та безпеку працівників, часто опускається на другий план. В результаті недбалого ставлення до охорони праці, відсутності відповідних вимог та їх ігнорування, працівники потрапляють під вплив шкідливих факторів виробництва, що суттєво знижує їхню продуктивність. Недоліки у організації робочих місць, такі як неуважне врахування ергономічних вимог чи несприятливе розташування обладнання, призводять до зростання непродуктивних витрат часу. Відсутність умов для відпочинку під час роботи додає напруги. Керівники підприємств ігнорують той факт, що поліпшення умов праці сприяє покращенню психологічного клімату, налагодженню робочих процесів та, відповідно, зростанню продуктивності праці.

Адаптація алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах відбувалася в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На розробника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання робочого місця

Робоче місце - це зона простору, оснащена необхідним устаткуванням, де працює один працівник або група працівників. Ефективне робоче місце забезпечує відповідні умови праці та оптимальний робочий процес. Кожне робоче місце має свої особливості, пов'язані з організацією виробничого процесу та характером роботи. Конструкція робочого місця і розташування його елементів повинні відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам [13, 14]

Рациональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Вимоги до конструкції меблів (робочий стіл, стілець (крісло), розташованих на робочих місцях користувача ПК, визначаються вимогами [15]. Відповідно до вимог екран ПК слід розташовувати на оптимальній відстані від очей працівника, але не ближче 0,4 м залежно від розміру екрана монітора.

Висота робочої поверхні столу для ПК має бути в межах 680 - 800 мм, а ширина - забезпечувати можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота - 725 мм, ширина - 600 - 1400 мм, глибина - 800 - 1000 мм.

Робочий стіл для ПК повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм.

Робочий стіл для ПК, як правило, має бути обладнаний підставкою для ніг шириною не менше 300 мм та глибиною не менше 400 мм, з можливістю регулювання по висоті в межах 150 мм та кута нахилу опорної поверхні - в

межах 20 град. Підставка повинна мати рифлену поверхню та бортик на передньому краї заввишки 10 мм. Застосування підставки для ніг тими, у кого ноги не дістають до підлоги, є обов'язковим.

Основні вимоги щодо роботи на ПК:

- не залишати працюючі ПК і їхні пристрої без нагляду;
- підключати і відключати роз'єми кабелів пристроїв ПК тільки при відключеній напрузі;
- подавати напругу на пристрої і окремі блоки ПК тільки після ретельної перевірки надійності кріплення провідників заземлення, справності кабелів і роз'ємів мережі електроживлення;
- при виявленні запаху горілого в пристроях ПК необхідно вимкнути апаратуру, повторно не включати і звернутися до спеціаліста з технічного обслуговування ПК;
- для профілактики порушень і підтримання працездатності оператора ПК власником повинні бути введені додаткові регламентовані перерви для відпочинку;
- у період роботи за дисплеєм необхідно передбачити через кожні 40 – 45 хв три-п'ятихвилинні перерви для відпочинку. Середня сумарна тривалість роботи за монітором за день не повинна перевищувати 4 год, а за тиждень 20 год [16].

В приміщенні, де проводилася робота з адаптації алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах використовується чотири провідна трифазна електромережа з заземленим нульовим проводом. Величина напруги цієї мережі становить 380 х 220В (фазна напруга (фаза – «0») – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Категорія умов з небезпеки електротравматизму – без підвищеної небезпеки [17].

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;

- 3) систематичне проведення інструктажу з електробезпеки;
- 4) суворе дотримання правил електробезпеки на робочому місці.

Таким чином, рівень організації та обслуговування робочих місць значно впливає на ступінь важкості, стомливості й привабливості праці. Чим раціональніше організоване робоче місце, чим воно зручніше, чим краще забезпечене всім необхідним для безперебійної та ритмічної роботи, тим менш утомливою буде праця, тим більша її привабливість, тим вищі працездатність працівника і рівень продуктивності його праці.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Виробниче приміщення - це простір у спеціально призначених будівлях та спорудах, де люди постійно або періодично займаються трудовою діяльністю протягом робочого дня.

Мікрокліматичні умови у виробничих приміщеннях є найважливішим санітарно-гігієнічним фактором, який має значний вплив на стан здоров'я та працездатність людини. Ці умови визначаються температурою повітря і поверхонь, вологістю, швидкістю руху повітря та тепловим випромінюванням. У санітарних нормах ДСН 3.3.6.042-99 [18] встановлені величини параметрів мікроклімату, що створюють комфортні умови. Ці норми встановлюються залежно від пори року, характеру трудового процесу і характеру виробничого приміщення (значні або незначні тепловиділення).

Робота з адаптації алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [19]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні	21 ... 25 ° C
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	до 0,1 м / с
Теплий	Температура повітря в приміщенні	22 ... 28 ° C
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	0,1 ... 0,2 м / с

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні використовується централізована парова система опалення (для підтримання температури в холодний період року) та система кондиціювання (для підтримання температури в теплий період року), а також систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Чистота повітря виробничого середовища є важливим фактором підтримання стабільної працездатності працівників, формування у них позитивного ставлення до роботи, підвищення продуктивності праці. Багатьма дослідженнями доведено, що система дихання людини найменш пристосована до забрудненої атмосфери. Слизові оболонки, легеневий апарат піддаються більшому впливу забрудненого повітря, ніж очі та шкіряний покрив. Разом з тим велика кількість виробничих процесів супроводжується утворенням дрібних часточок твердих або рідких речовин, які утримуються в повітрі. Кількість домішок – газів, парів, пилу, які містяться в одному літрі або одному кубічному метрі повітря у грамах, характеризує ступінь забруднення виробничого середовища.

В приміщенні, де виконується робота з адаптації алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах, можливими шкідливими речовинами у повітрі є фенол, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні, через вікна, двері та заноситься співробітниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Середньо добова	Клас небезпечності
	Максимально разова		
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування та вологого прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення на робочих місцях справляє багатоплановий вплив на працівника, зокрема на його емоційний стан, працездатність, мотивацію, продуктивність і безпеку праці. Світло є не тільки важливою умовою роботи зорового аналізатора, а й біологічним фактором розвитку організму людини в цілому. Для людини день і ніч, світло і темрява визначають біологічний ритм –

неспаннн та сон. Отже, недостатня освiтленiсть або її надмiрна кiлькiсть знижують рiвень збудженостi центральної нервової системи i активнiсть усiх життєвих процесiв. Рациональне освiтлення є важливим фактором загальної культури виробництва. Неможливо забезпечити чистоту та порядок у примiщеннi, в якому напiвтемрява, свiтильники бруднi або в занедбаному станi.

Згiдно ДБН В.2.5-28-2018 208] в примiщеннi, де здiйснюється робота з адаптацiї алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах за допомогою ПК необхідно застосувати систему комбiнованого освiтлення. Норми освiтленостi при штучному освiтленнi та КПО (для III пояса свiтлового клiмату) при природному та сумiсному освiтленнi для роботи зазначенi у таблицi 4.4:

Таблиця 4.4 - Норми освiтленостi в примiщеннi

Характеристика зорової роботи	Найменший розмiр об'єкта розрiзнявання	Розряд зорової роботи	Пiдрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрiзнявання з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освiтлення		Природне освiтлення		Сумiсне освiтлення	
						Комбiноване	Загальне	Верхнє або верхнє i бокове	Бокове	Верхнє або верхнє i бокове	Бокове
Високої точностi	0,3 -0,5	III	г	великий	свiтлий	700	300	5	2	3	1,2

Для забезпечення достатнього освiтлення передбаченi такi заходи:

- 1) Максимальне використання бiчного природного освiтлення.
- 2) Систематичне очищення скла вiд бруду – не рiдше двох разiв на рiк.
- 3) Систематична заміна перегорiлих ламп.

4.2.4 Виробничий шум

Шкідливий та небезпечний вплив шуму на організм людини встановлено з повною достовірністю. Ступінь такого впливу, переважно, залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Численні дослідження підтвердили той факт, що шум належить до загальнофізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини. Так, дія шуму може спричинити нервові, серцево-судинні захворювання, виразкову хворобу, порушення обмінних процесів та функціонування органів слуху тощо.

Джерелом шуму під час розробки підсистеми контролю знань користувачів дистанційних курсів технічних дисциплін з використанням сучасних технологій програмування є працююча офісна техніка, а також – рух автотранспорту біля будинку. У табл. 4.4 вказані граничні рівні звуку залежно від категорії тяжкості і напруженості праці, що є безпечними відносно збереження здоров'я і працездатності згідно ДСН 3.3.6.037-99 [21].

Таблиця 4.4 – Граничні рівні звуку, дБ, на робочих місцях.

Категорія напруженості праці	Категорія важкості праці			
	I. Легка	II. Середня	III. Важка	IV. Дуже важка
I. Мало напружений	80	80	75	75
II. Помірно напружений	70	70	65	65
III. Напружений	60	60	-	-
IV. Дуже напружений	50	50	-	-

Для зниження рівня шуму стіни і стеля приміщень, де встановлені комп'ютери, можуть бути облицьовані звукопоглинальними матеріалами.

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Розробка підсистеми контролю знань користувачів дистанційних курсів технічних дисциплін з використанням сучасних технологій програмування відбувалася за допомогою ПК, відповідно існує ймовірність впливу ЕМП на працівника.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини взагалі залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму. У результаті дії ЕМП на людину можливі гострі та хронічні форми порушення фізіологічних функцій організму.

Ці порушення виникають в результаті дії електричної складової ЕМП на нервову систему, в також на структуру кори головного та спинного мозку, серцево-судинної системи. У більшості випадків такі зміни в діяльності нервової та серцево-судинної системи мають зворотній характер, але в результаті тривалої дії вони накопичуються, підсилюються з плином часу, але, як правило, зменшуються та зникають при виключенні впливу та поліпшенні умов праці. Тривалий та інтенсивний вплив ЕМП призводить до стійких порушень та захворювань.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Заходи щодо зменшення впливу на працівника електромагнітного випромінювання: оптимальна організація робочого місця, доцільне розміщення технологічного устаткування, дотримання гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

4.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – це стан об’єкта, при якому з регламентованою ймовірністю виключається можливість виникнення та розвиток пожежі і впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей. Забезпечення пожежної безпеки є складовою частиною виробничої та іншої діяльності посадових осіб, працівників підприємств, установ, організацій та підприємців. Це повинно бути відображено у трудових договорах (контрактах) та статутах підприємств, установ та організацій.

В приміщенні, де проводилася робота з адаптації алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах, використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д» [22]. За вогнестійкістю приміщення відноситься до третьої категорії [23].

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де виконувалася робота такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;
- залишення без нагляду увімкнутих комп’ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- проведення навчань з питань пожежної безпеки (інструктажі та пожежно-технічні мінімуми);
- суворе дотримання правил і норм, визначених чинними нормативними документами при реконструкції приміщень, будівлі, технічне переобладнання електромережі, опалення, вентиляції, освітлення тощо;
- заборона паління та застосування відкритого вогню у приміщенні;
- своєчасне проведення профілактичних оглядів, випробувань, ремонтів обчислювальної техніки та допоміжного устаткування.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних чинників пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї. Протипожежний захист підприємства здійснюється за такими чотирма напрямками.

1. Обмеження розмірів та поширення пожежі: розміщення будівель та споруд на території об'єкта із дотриманням протипожежних розривів та інших вимог пожежної безпеки; дотримання обмежень стосовно кількості поверхів будівель та площі поверху; правильне планування та розміщення виробничих цехів, приміщень, ділянок у межах будівлі; вибір будівельних конструкцій необхідних ступенів вогнестійкості; встановлювання протипожежних перешкод у будівлях, системах вентиляції; облаштування систем автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння.

2. Обмеження розвитку пожежі: обмеження кількості горючих речовин, що одночасно знаходяться в приміщенні; використання оздоблювальних будівельних та конструкційних матеріалів з нормативними показниками вибухопожежонебезпечності.

3. Забезпечення безпечної евакуації людей та майна: вибір такого об'ємно-планувального та конструктивного виконання будівлі, щоб евакуація людей була завершена до настання гранично допустимих рівнів чинників

пожежі; застосування аварійного вимкнення устаткування та комунікацій; облаштування систем протидимового захисту, які запобігають задимленню шляхів евакуації; влаштування необхідних шляхів евакуації (коридорів, сходових кліток, зовнішніх пожежних драбин), раціональне їх розміщення та належне утримання.

4. Створення умов для успішного гасіння пожежі: встановлення в будівлях та приміщеннях установок пожежної автоматики; забезпечення приміщень нормованою кількістю первинних засобів пожежогасіння.

У приміщені на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, що відповідає нормам [25]. Підходи до засобів первинного пожежогасіння та відключення електросхем устаткування вільні.

У коридорі приміщення розташована схема евакуації людей при пожежі. Шляхи евакуації з відділу відповідають правилам пожежної безпеки. У будинку є два виходи, ширина коридору – 2-3 метри, ширина дверей – 0,8 м., двері відкриваються по ходу руху людей у випадку евакуації.

4.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

ВИСНОВКИ

У промислових умовах Wi-Fi мережі стикаються з низкою проблем та викликів (електромагнітні завади, висока щільність пристроїв, фізичні перешкоди, вимоги до надійності та безпеки, високі вимоги до продуктивності, складність управління та моніторинг), які можуть суттєво ускладнити роботу. Їх аналіз проведено у роботі.

Проаналізовано найпоширеніші причини, що впливають на роботу безпроводних мереж Wi-Fi у промислових умовах, та сформульовані рекомендації щодо можливості забезпечення їх нормальної роботи у таких умовах. Для забезпечення сумісності з аналогічними Wi-Fi-пристроями (точки доступу, безпроводні камери тощо) рекомендовано звернути увагу на вибір частотного каналу роутера. У деяких випадках на точці доступу рекомендується знизити потужність сигналу Wi-Fi до рівня 50-75%. Сформульовані рекомендації стосовно зменшення впливу пристроїв Bluetooth.

Проаналізовано втрати ефективності сигналу Wi-Fi під час проходження через різні середовища. Дані наведені для мережі, що працює у частотному діапазоні 2.4 ГГц. Показано ступінь зменшення ефективної відстані (зменшення радіусу дії сигналу Wi-Fi) після проходження різних перешкоди у порівнянні з відкритим простором.

Виконано аналіз факторів, які впливають на основний параметр мережі Wi-Fi – швидкість передачі даних: поширення у середовищі загального користування; багатопроменева інтерференція; доплерівський ефект; частотно-залежне згасання.

В стандартах Wi-Fi, які найбільш адаптовані до роботи в промислових середовищах, використовується технологія OFDM з квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ) на множині піднесущих. Розглянуто математичні аспекти методу формування символів квадратурної амплітудної модуляції з використанням квадратурних компонент.

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: 802.11n, 802.11ac, 802.11ah, 802.11ah (Wi-Fi HaLow) та 802.11s (Wi-Fi Mesh).

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

У рамках стандарту 802.11s детально 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.

Розглянуто параметри ефективності та завадостійкості QAM-N модуляції. Визначено її потенційні характеристики та доцільність завадостійкого кодування в заданих умовах експлуатації.

Введення в інформаційний сигнал при кодуванні надлишкових символів супроводжується негативним ефектом - зниженням швидкості передачі корисного навантаження. Отже, для збереження швидкості передачі корисного навантаження необхідно підвищення кратності модуляції або розширення смуги частот каналу.

Виконано розрахунки радіоканалу передачі даних. Результати розрахунку показують, що згасання в антенно-фідерному тракті незначне, що дає змогу отримати хороше сумарне підсилення; дальність системи достатня; енергетичний запас радіоканалу має місце.

У роботі також наведено основні заходи з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. 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.
3. Costas.J.P.”Synchronous communications proceedings of the IRE”, Vol.47, p.p.2058-2068, 1959.
4. Marc Stebber J. PSK Demodulation (Part 1), WJ Communications, Inc,2001.
5. Kikkert C.J. Digitally demodulating binary phase shift keyed data signals, In Practice, Canberra, 1999.
6. 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.
7. 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.
8. Головін Ю.О. Основи радіозв'язку з рухомими об'єктами : навч. посіб. Київ : ІСЗЗІ НТУУ КПІ, 2016. 322 с.
9. 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. Єрмоєнко, В.І. Корсун. – Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2020 – с. 12-25 Conference 28 June 2021.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

14. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028

15. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

16. Про мінімальні вимоги безпеки при роботі з дисплейним обладнанням: 90/270/ЕЭС. Брюссель : Рада Європейських співтовариств, 1990. URL: <http://docs.pravo.ru/document/view/32704903/>

17. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

18. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

19. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

20. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

21. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

22. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

23. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

24. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

25. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

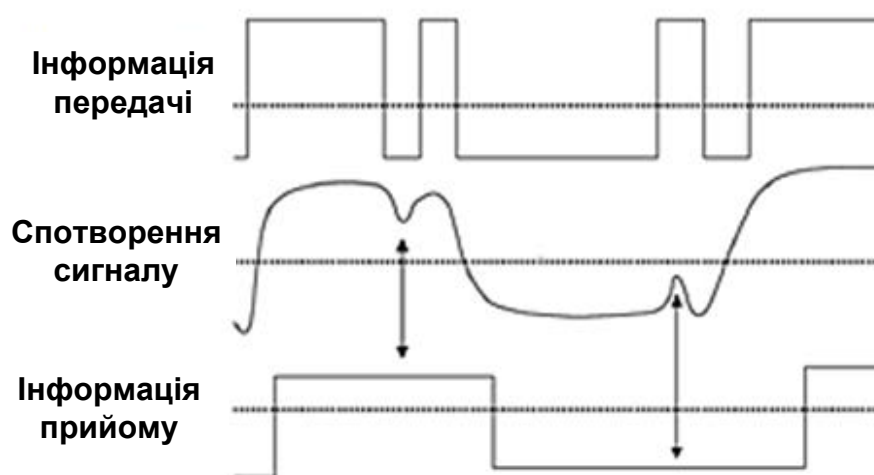
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
АДАПТАЦІЯ АЛГОРИТМУ РОБОТИ Wi-Fi В ПРОМИСЛОВИХ
СЕРЕДОВИЩАХ

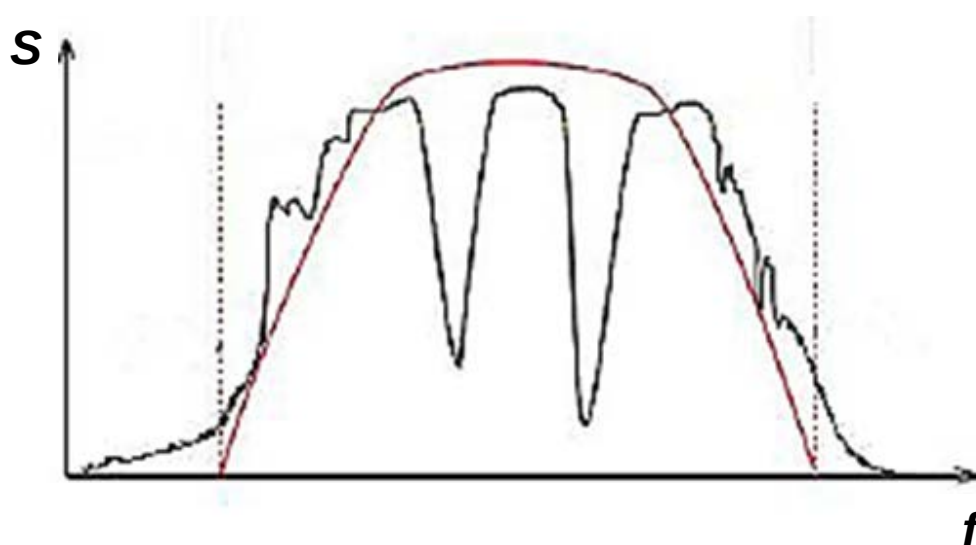
назва бакалаврської дипломної роботи

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

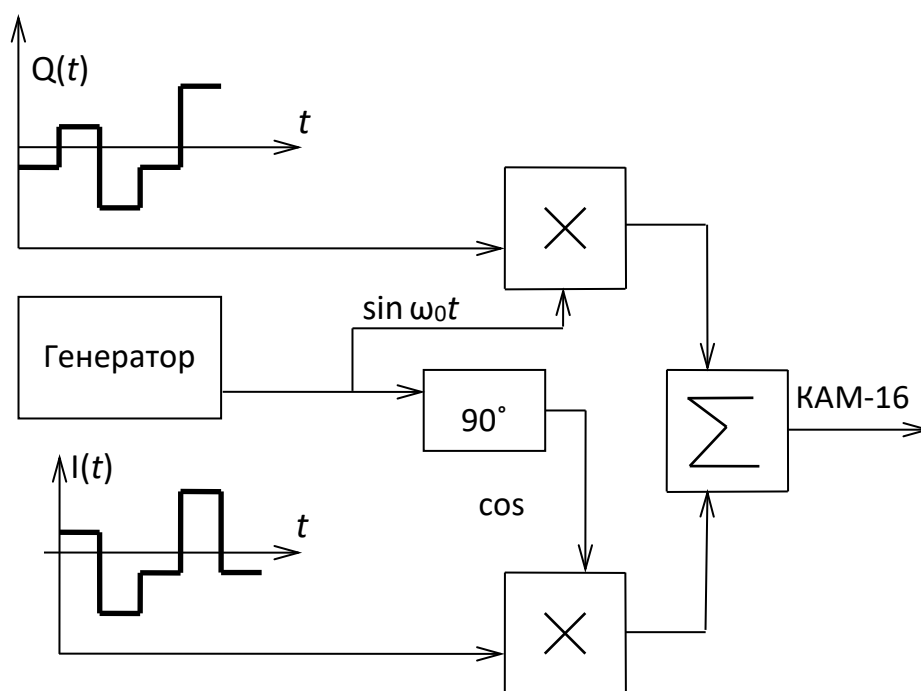
Перешкода	Додаткові втрати, дБ	Ефективна відстань, %
Відкритий простір	0	100
Вікно без тонування (відсутнє металізоване покриття)	3	70
Вікно з тонуванням (металізоване покриття)	5-8	50
Дерев'яна стіна	10	30
Міжкімнатна стіна (15,2 см)	15-20	15
Несуча стіна (30,5 см)	20-25	10
Бетонна підлога/стеля	15-25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



Спотворення сигналу під впливом
міжсимвольної інтерференції

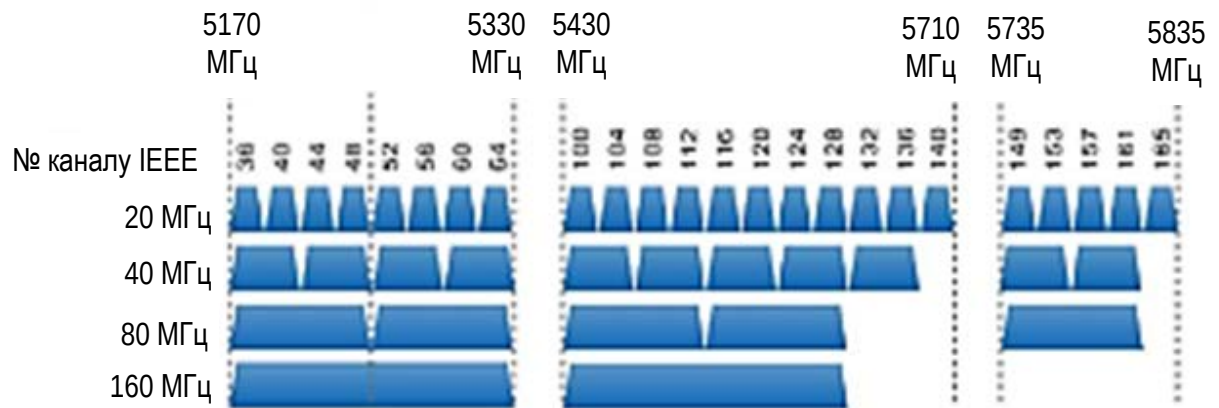


Спотворення спектру сигналу при відбитті від перешкод

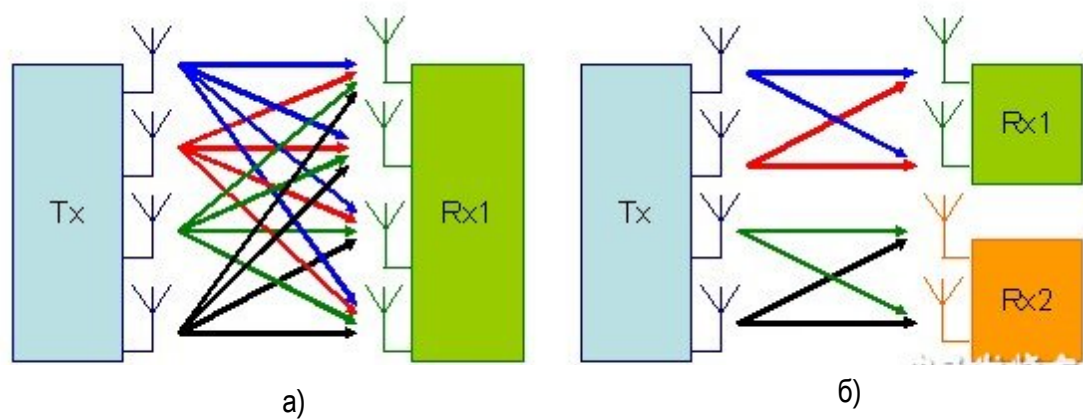


Спрощена структурна схема модулятора QAM-16

Стандарт 802.11ac (Wi-Fi 5)



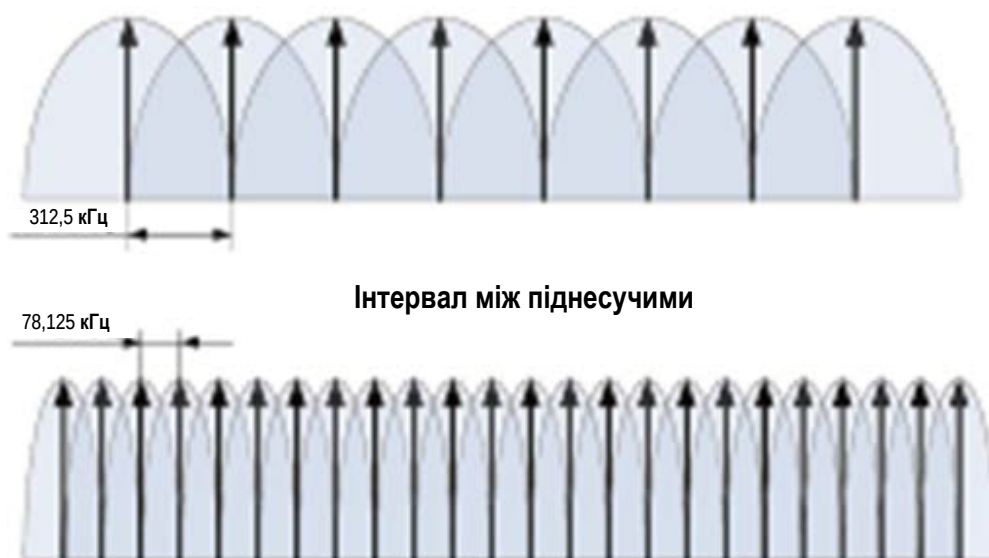
Розподіл каналів у сегментах діапазону



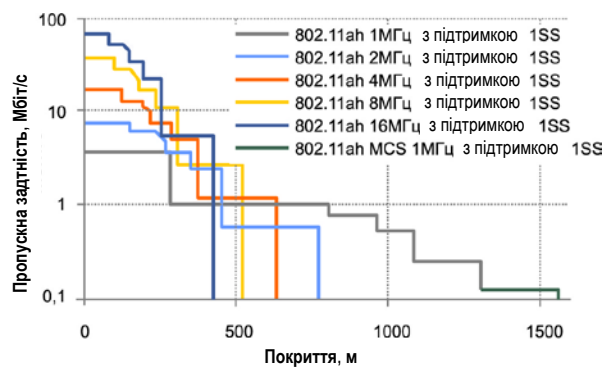
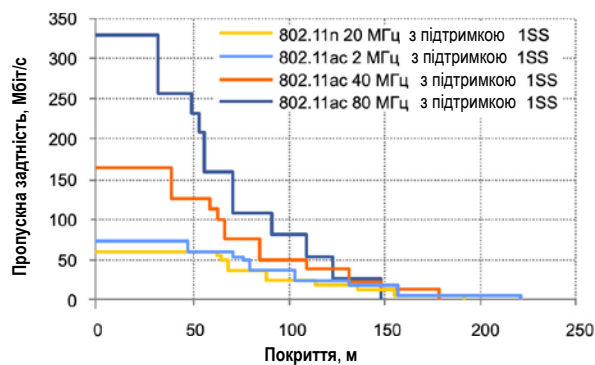
Режими SU- і MU-MIMO:

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

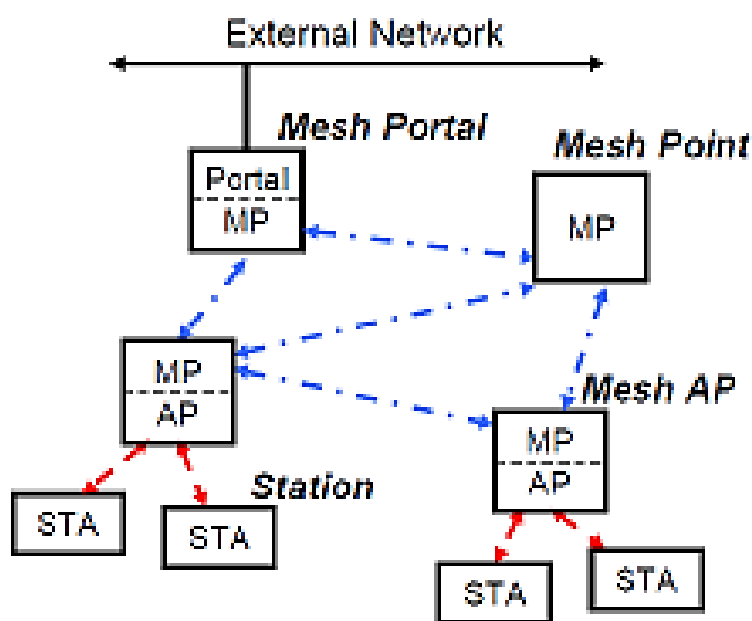
Стандарт 802.11ax (Wi-Fi 6)



Зміна інтервалу між несущими OFDM-сигналу
в стандарті 802.11ax



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



Архітектура WMN мережі на базі 802.11s

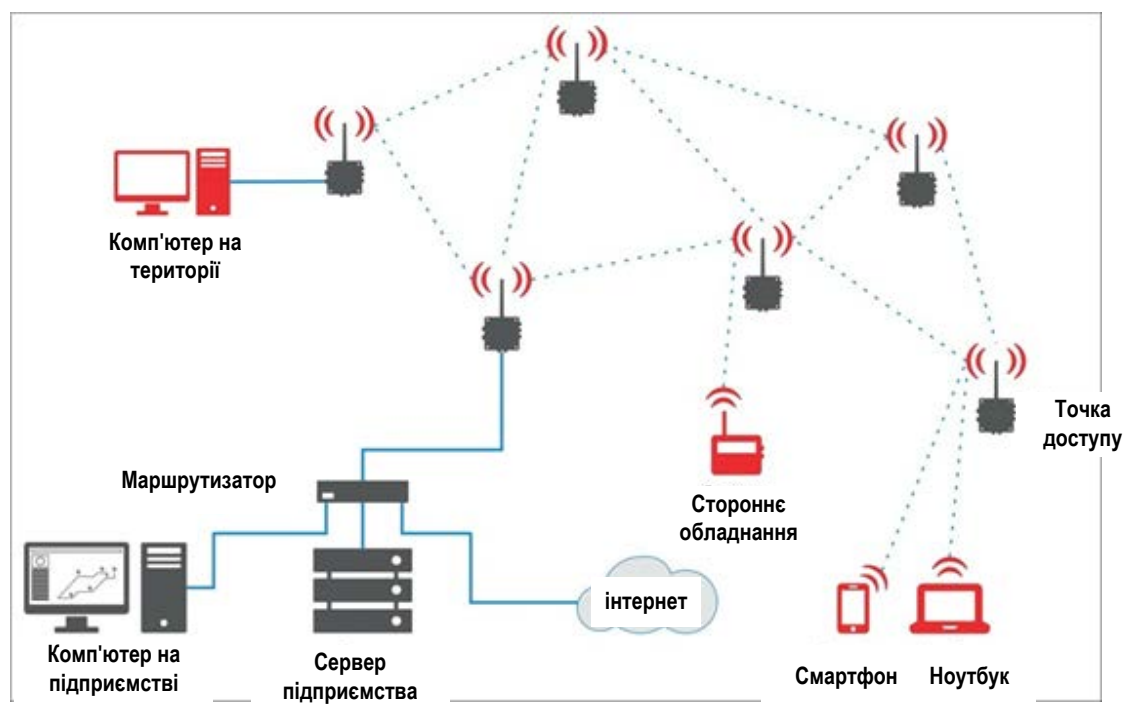


Схема промислового Wi-Fi

Додаток Б

Протокол
перевірки кваліфікаційної роботи
на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Адаптація алгоритму роботи Wi-Fi в промислових середовищах

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота

(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет
Інформаційних електронних систем

(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 87,6% Схожість 12,4 %

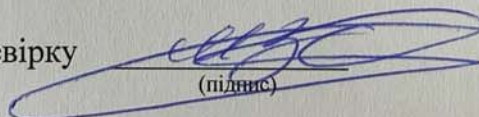
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

☐ 3. 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.

Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

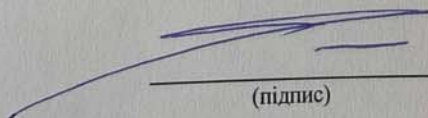
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Паламаренко Ю.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.
(прізвище, ініціали)