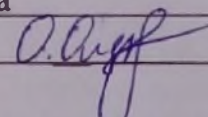


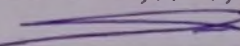
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

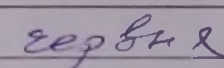
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

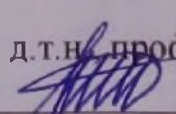
**УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ BEAMFORMING У МЕРЕЖАХ Wi-Fi
ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ МІЖСИМВОЛЬНОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ**

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-216
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

 Олянич О. Ю.

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

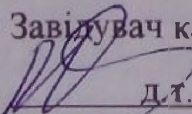
« 11 »  2025 р.

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

« 11 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2025 р.

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

«5» 05 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Оляничу Олександру Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Удосконалення алгоритму beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, доцент,

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

затверджені наказом ВНТУ від «20» березня 2025 року № 97

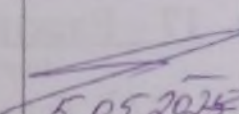
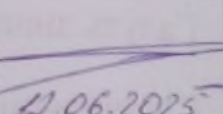
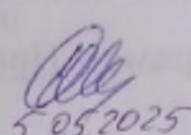
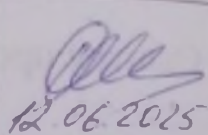
2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: багатопроменеве поширення радіохвиль, адаптація тривалості циклічного префікса у межах (1/4-1/32) тривалості символу OFDM, діапазон частот (500-5000) МГц, діапазон змін рівня швидких завмирань – до 40 дБ, повільних – (5-10)дБ, типовий час затримки для умов офісу становить (20-200) нс, в умовах міської забудови – (5-10) мкс, в сільській місцевості – до 0,2 мс; конфігурація MIMO для моделювання 4x2.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, проблема інтерференції у Wi-Fi та постановка задачі дослідження, компенсація міжсимвольної інтерференції за допомогою OFDM, множинний доступ з ортогональним частотним мультиплексуванням, технологія beamforming, моделювання роботи каналу при використанні технології beamforming, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): призначення захисного інтервалу при модуляції OFDM, формування повного символу OFDM, розподіл каналу 20 МГц на ресурсні блоки, положення користувачів відносно точки доступу (активний користувач у зоні деструктивної інтерференції), конструктивна інтерференція у зоні активного клієнта, механізм «нульового керування» в MU-MIMO (MIMO- Beamforming), результати моделювання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 5.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В. проф. каф. БЖДПБ	 5.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент

(підпис)

Олянич О. Ю.

Керівник роботи

(підпис)

Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

УДК 681.324

Олянич О. Ю. Удосконалення алгоритму beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 88 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 32 назв; рис.: 30; табл. 8.

Робота присвячена дослідженню спеціальних алгоритмів роботи систем Wi-Fi, які забезпечують надійну передачу даних, мінімізацію затримок та ефективно придушення міжсимвольної інтерференції при мультишляховому поширенню радіохвиль.

Метою роботи є удосконалення спеціальних алгоритмів beamforming та MIMO-beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції.

Основними завданнями роботи є аналіз проблем інтерференції у мережах Wi-Fi та визначення напрямків боротьби з нею, оцінка ефективності технологій ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням та множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів, аналіз ефективності алгоритму beamforming у зменшенні міжсимвольної інтерференції.

Робота містить шість розділів. У першому розділі виконано дослідження проблем інтерференції у мережах Wi-Fi та визначені напрямки боротьби з міжсимвольною інтерференцією.

У другому розділі дана оцінка компенсації міжсимвольної інтерференції за допомогою технології ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням OFDM.

У третьому розділі виконано аналіз ефективності технології множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів OFDMA.

У четвертому розділі дана оцінка технологій beamforming та MU-MIMO-Beamforming.

У п'ятому розділі виконано моделювання роботи каналу при використанні технології beamforming.

У шостому розділі виконано розрахунки, які стосуються охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: мережі Wi-Fi, алгоритми, міжсимвольна інтерференція, моделювання, охорона праці.

ABSTRACT

Olyanych O. Yu. Improvement of the beamforming algorithm in Wi-Fi networks to reduce intersymbol interference. Bachelor's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - software for telecommunications systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 88 p.

In Ukrainian. Bibliography: 32 titles; fig.: 30; tab. 8.

The work is devoted to the study of special algorithms for the operation of Wi-Fi systems, which ensure reliable data transmission, minimization of delays and effective suppression of intersymbol interference during multipath propagation of radio waves.

The purpose of the work is to improve special beamforming and MIMO-beamforming algorithms in Wi-Fi networks to reduce intersymbol interference.

The main objectives of the work are to analyze interference problems in Wi-Fi networks and determine the directions for combating it, assess the effectiveness of orthogonal frequency division multiplexing and orthogonal frequency division multiple access technologies, and analyze the effectiveness of the beamforming algorithm in reducing intersymbol interference.

The work contains six sections. The first section studies interference problems in Wi-Fi networks and identifies directions for combating intersymbol interference.

The second section evaluates intersymbol interference compensation using orthogonal frequency division multiplexing technology OFDM.

The third section analyzes the effectiveness of orthogonal frequency division multiple access technology OFDMA.

The fourth section evaluates beamforming and MU-MIMO-Beamforming technologies.

The fifth section simulates channel operation using beamforming technology.

The sixth section performs calculations related to occupational health and safety.

Keywords: Wi-Fi networks, algorithms, intersymbol interference, modeling, occupational safety.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 ПРОБЛЕМА ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ У Wi-Fi ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1 Умови роботи Wi-Fi.....	7
1.1.1 Потужності вузлів мережі Wi-Fi.....	7
1.1.2 Вплив інтерференції.....	9
1.1.3 Джерела завад.....	12
1.1.4 Інші особливості безпроводних каналів.....	14
1.2 Канали з завмираннями	16
1.3 Постановка задачі дослідження	18
1.4 Висновки до розділу	20
2 КОМПЕНСАЦІЯ МІЖСИМВОЛЬНОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ OFDM	22
2.1 Основні принципи OFDM	22
2.2 Компенсація міжсимвольної інтерференції.....	28
2.3 Висновки до розділу	32
3 МНОЖИННИЙ ДОСТУП З ОРТОГОНАЛЬНИМ ЧАСТОТНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ	33
3.1 Загальні положення.....	33
3.2 Ресурсні блоки	35
3.3 Низхідний та висхідний канали	38
3.4 Висновки до розділу	40
4 ТЕХНОЛОГІЯ BEAMFORMING	41
4.1 Доцільність формування направленої сигналу у Wi-Fi.....	41
4.2 Принцип роботи beamforming.....	43
4.3 Технологія MU-MIMO-Beamforming	49
4.4 Висновки до розділу	63

5 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КАНАЛУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕХНОЛОГІЇ BEAMFORMING	64
5.1 Матриці керування.....	64
5.2 Моделювання при передачі сигналу з просторовим розширенням.....	57
5.3 Моделювання при передачі сигналу з формуванням променя.....	59
5.4 Висновки до розділу	59
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	60
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	61
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	67
6.2.1 Мікроклімат	67
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	68
6.2.3 Виробниче освітлення.....	69
6.2.4 Виробничий шум.....	70
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	70
6.3 Пожежна безпека.....	71
6.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	72
6.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	73
6.4 Висновки до розділу	75
ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина	81
Додаток Б. Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AP – Access Point (точка доступу)

Beamforming – формування променя

CP – cyclic prefix (циклічний префікс)

CSI - Channel State Indication/Information (стан каналу)

CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (множинний доступ з контролем несівної та запобігання колізії)

IFFT - Inverse Fast Fourier Transformation (зворотне швидке перетворення Фур'є)

ISI - inter symbol interference (міжсимвольна інтерференція)

MIMO - multiple-input multiple-output (системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами)

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

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

OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access (множинний доступ з ортогональним розділенням каналів)

RSIS - received signal strength indicator (показник рівня вхідного сигналу)

RU – Resource Units (ресурсні блоки)

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

STA - Station mode (безпроводна станція)

ВЦ – вичислювальний центр

ГДК - гранично допустима концентрація

ЕМП - електромагнітне поле

ЗШПФ – зворотне швидке перетворення Фур'є

КПО – коефіцієнт природного освітлення

ПК – персональний комп'ютер

ВСТУП

Актуальність теми. Мережі стандартів IEEE802.11 Wi-Fi розгортаються у різних умовах експлуатації, що визначає цілу низку зовнішніх чинників, які супроводжують її роботу та впливають на технічні характеристики [1-4]. Серед таких чинників: інші Wi-Fi пристрої (точки доступу, безпроводні камери тощо), Bluetooth-пристрої, що працюють у відповідній зоні покриття, значні відстані між Wi-Fi пристроями, перешкоди у вигляді стін, стелі, меблів, металевих дверей тощо, різноманітна побутова техніка, що працює у відповідній зоні покриття. Одним з найвпливовіших чинників вважається багатопроменеве поширення радіохвиль.

При багатопроменовому поширенні радіохвиль сигнал, що надходить до приймача, містить не тільки складову сигналу прямої видимості, але й велику кількість перевідбитих хвиль, які надходять до приймача у різні моменти часу. Затримані сигнали є результатом перевідбиття від різноманітних об'єктів та перешкод, що розташовуються на шляху поширення сигналу між точкою доступу та абонентським пристроєм.

У безпроводному зв'язку приймач обробляє сигнали, які надходять з різних джерел. Сигнали, що потрапляють на приймач, можуть взаємодіяти між собою, що призводить до спотворення інформації. Такі спотворення, викликані багатопроменевістю, включають затримку сигналу, втрати його потужності та розширення частотного спектру [3-5]. В основі спотворень сигналу на вході приймача є інтерференція, яка може бути конструктивною (підсилення сигналу) або деструктивною (завмирання, придушення сигналу). Найбільш дошкульною вважається міжсимвольна інтерференція – результат взаємодії сусідніх символів, один з яких є затриманим через різноманітні його перевідбиття на шляху до антени приймача.

Міжсимвольна інтерференція впливає на структуру сигналу, що погіршує його обробку і призводить до появи спотворень переданої інформації. Це означає, що потрібні відповідні технічні рішення, які б забезпечували

ефективну роботу в таких умовах. Такими технічними рішеннями вважаються технології OFDM, OFDMA, MIMO та алгоритм beamforming. Таким чином, дослідження ефективності цих алгоритмів та технологій для зменшення впливу міжсимвольної інтерференції є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. Алгоритм beamforming - важлива технологія для поліпшення якості безпроводного зв'язку, оскільки дозволяє спрямувати радіосигнал у бік конкретного приймача, зменшуючи інтерференцію і підвищуючи ефективність передачі даних. Особливо корисна в мережах з великими навантаженнями та в умовах високої щільності користувачів [4 – 5]. Цей алгоритм використовується у стандартах Wi-Fi 5 (802.11ac), Wi-Fi 6 (6E) (802.11ax) та впроваджується у стандарті Wi-Fi 7 (802.11be) на частотах 5 ГГц та 6 ГГц. Технологія beamforming дозволяє краще справлятися з завадами у середовищі, оскільки сигнал фокусується на певних зонах, що знижує вплив об'єктів, які можуть блокувати або поглинати радіосигнали [5-7].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є удосконалення спеціальних алгоритмів beamforming та MIMO-beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз проблем інтерференції у мережах Wi-Fi та визначення напрямків боротьби з нею;
- оцінка ефективності компенсації міжсимвольної інтерференції за допомогою технології OFDM;
- оцінка ефективності технології множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів OFDMA;
- аналіз ефективності алгоритму beamforming;
- моделювання роботи каналу при використанні технології beamforming;
- охорона праці та безпека життєдіяльності.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 ПРОБЛЕМА ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ У Wi-Fi ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Умови роботи Wi-Fi

1.1.1 Потужності вузлів мережі Wi-Fi

Потужність передавача роутера є одним із ключових параметрів. Бюджетні моделі зазвичай мають потужність близько 17 дБм або менше, що дозволяє сигналу стабільно проходити крізь не більше ніж дві стіни. У більшості країн максимально допустима потужність у діапазоні 2.4 ГГц становить 20 дБм (100 мВт). Деякі Wi-Fi-роутери технічно здатні працювати на значно вищих рівнях потужності, досягаючи 27 дБм (500 мВт).

Щільність потужності радіохвиль зменшується зі збільшенням відстані від антени через розходження пучка, розсіювання та поглинання сигналу перешкодами. Орієнтовна залежність щільності потужності хвилі від відстані до джерела описується у [4].

$$P(d) \approx P_t \left(d_0 / d \right)^\gamma, \quad (1.1)$$

де d_0 – деяка константа, що визначається експериментально; $\gamma \approx 2 \dots 6$ [4] залежить від конструкції антени, діапазону частот, наявності перешкод на шляху поширення електромагнітної хвилі (часто приймають $\gamma \approx 2 \dots 3$); P_t – щільність потужності на відстані d_0 від джерела. Формула (1.1) справедлива для $d > d_0$.

Через обмежену зону впевненого прийому кожен учасник бездротової мережі має сфероподібну область стабільного сигналу. Це потребує ретельного планування розташування бездротових станцій, щоб їхні зони перекривалися, забезпечуючи надійний зв'язок. Якщо станції знаходяться на межі зони

прийому, навіть незначні зміни в оточенні можуть спричинити втрату сигналу або зниження швидкості передачі даних.

Однак підвищення потужності передавача Wi-Fi не завжди означає покращення роботи мережі. У певних випадках рекомендується зменшити потужність сигналу до 50-75%, особливо якщо радіоефір перевантажений іншими мережами. Високий рівень внутрішньоканальних і міжканальних завад збільшує шум у каналі зв'язку, що спричиняє часті повторні передачі пакетів та знижує стабільність мережі. У таких ситуаціях доцільно зменшити потужність передавача.

Альтернативні методи покращення стабільності зв'язку включають:

- Збільшення відстані між точкою доступу та адаптером (якщо можливо).
- Відключення антени на точці доступу (за наявності такої можливості).
- Використання антен із нижчим коефіцієнтом підсилення (наприклад, 2 dBi замість 5 dBi).

Рівень потужності передавача в роутері зазвичай у 2-3 рази вищий, ніж у мобільних пристроях (ноутбуках, смартфонах, планшетах). Це може створювати ситуації, коли користувач добре приймає сигнал точки доступу, але сама точка доступу погано приймає сигнал від пристрою. Така асиметрія виникає через різницю в потужності та чутливості приймачів, що може призводити до проблем із підключенням, навіть якщо сигнал на пристрої відображається як достатній.

Для стабільного з'єднання важливо забезпечити максимально симетричний зв'язок між точкою доступу та пристроєм. Іноді для усунення асиметрії та покращення стабільності мережі доцільно знизити потужність передавача точки доступу.

Розглянемо втрати сигналу в мережі Wi-Fi, спричинені різними перешкодами, такими як стелі, меблі, стіни, металеві двері тощо. Якщо між Wi-Fi-пристроями знаходяться ці об'єкти, можливе часткове або повне загасання сигналу через його відбиття чи поглинання. Особливо суттєвий вплив мають

капітальні стіни, штукатурка, сталеві каркаси та інші будівельні матеріали. Навіть людське тіло може знизити рівень сигналу приблизно на 3 дБ.

У таблиці 1.1 наведено дані про втрати ефективності сигналу Wi-Fi на частоті 2.4 ГГц при проходженні через різні середовища. Показник ефективної відстані відображає радіус дії сигналу Wi-Fi у відсотках відносно відкритого простору (100%).

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

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

1.1.2 Вплив інтерференції

Під час поширення електромагнітна хвиля від передавальної станції зазнає інтерференції, дифракції, відбиття, заломлення та розсіювання. У точці прийому вона є суперпозицією численних хвиль із різними фазами та напрямками хвильового вектора. Це накладання хвиль спричиняє інтерференцію, яка може бути конструктивною (підсилення сигналу) або деструктивною (ослаблення сигналу, відоме як "завмирання").

Деструктивна інтерференція має кілька негативних наслідків:

1. Сигнал у точці прийому може стати нижчим за поріг чутливості приймача, що спричиняє втрату зв'язку.

2. При русі джерела або приймача рівень сигналу може постійно змінюватися, що веде до втрати бітів інформації та зниження швидкості передачі через повторні передачі кадрів із помилками.
3. Якщо різниця затримки між хвилями, що пройшли різними шляхами, перевищує тривалість символу, виникає міжсимвольна інтерференція, коли сусідні символи накладаються один на одного.

Одним із неминучих явищ у бездротовій передачі є багатопроменева інтерференція. Вона виникає через багаторазові відбиття сигналу від різних поверхонь, унаслідок чого той самий сигнал досягає приймача різними шляхами та з різним рівнем ослаблення. У результаті приймач отримує комбінацію сигналів із різними амплітудами та фазами, що еквівалентно їхньому накладанню з різними фазовими зміщеннями.

Основним наслідком багатопроменевої інтерференції є спотворення прийнятого сигналу. Вона властива всім типам сигналів, але найбільш негативно впливає на широкосмугові сигнали. Це пов'язано з тим, що під час інтерференції одні частоти можуть підсилюватися через синфазне накладання, тоді як інші – ослаблюватися через протифазне накладання, що призводить до нерівномірності спектру сигналу.

У разі багатопроменевої інтерференції, що виникає під час передачі сигналів, можна виділити два крайні випадки. У першому випадку максимальна затримка між різними відбитими сигналами не перевищує тривалості одного символу, і інтерференція відбувається в межах цього символу. У другому випадку затримка є більшою за тривалість символу, що призводить до накладання сигналів, які представляють різні символи. Це явище відоме як міжсимвольна інтерференція (Inter Symbol Interference, ISI).

Найбільші проблеми для зв'язку спричиняє саме міжсимвольна інтерференція. Оскільки кожен символ має свої унікальні характеристики (амплітуду, фазу та частоту несучої), відновлення початкового сигналу після такого накладання стає вкрай складним.

Для часткової компенсації багатопроменевого поширення використовують частотні еквалайзери, однак їхня ефективність знижується зі збільшенням швидкості передачі даних. Наприклад, при швидкості 11 або 22 Мбіт/с (з використанням ССК-кодів або згорткового кодування) схеми компенсації міжсимвольної інтерференції працюють достатньо ефективно. Однак при ще вищих швидкостях такий підхід стає неприйнятним.

Для забезпечення високих швидкостей передачі в новітніх стандартах Wi-Fi (починаючи з 802.11a) застосовується інший метод кодування. Замість передачі даних на одній частоті потік інформації розподіляється між численними частотними підканалами, і дані передаються паралельно по всіх цих підканалах (рис. 1.1). Це дозволяє досягти високої загальної швидкості, навіть якщо швидкість передачі в окремому підканалі залишається відносно невисокою.

Оскільки в кожному частотному підканалі можна обмежити швидкість передачі, це допомагає ефективно придушувати міжсимвольну інтерференцію. Проте при частотному поділі каналів необхідно дотримуватися балансу:

- Канал має бути достатньо вузьким, щоб мінімізувати спотворення сигналу.
- Водночас канал має бути достатньо широким для підтримки необхідної швидкості передачі.
- Частотні підканали слід розташовувати щільно для ефективного використання доступного спектра, водночас уникаючи міжканальної інтерференції.

Для досягнення цього використовують ортогональні частотні канали. Ортогональність несучих сигналів означає їхню частотну незалежність, що запобігає міжканальній інтерференції та забезпечує ефективну передачу даних.

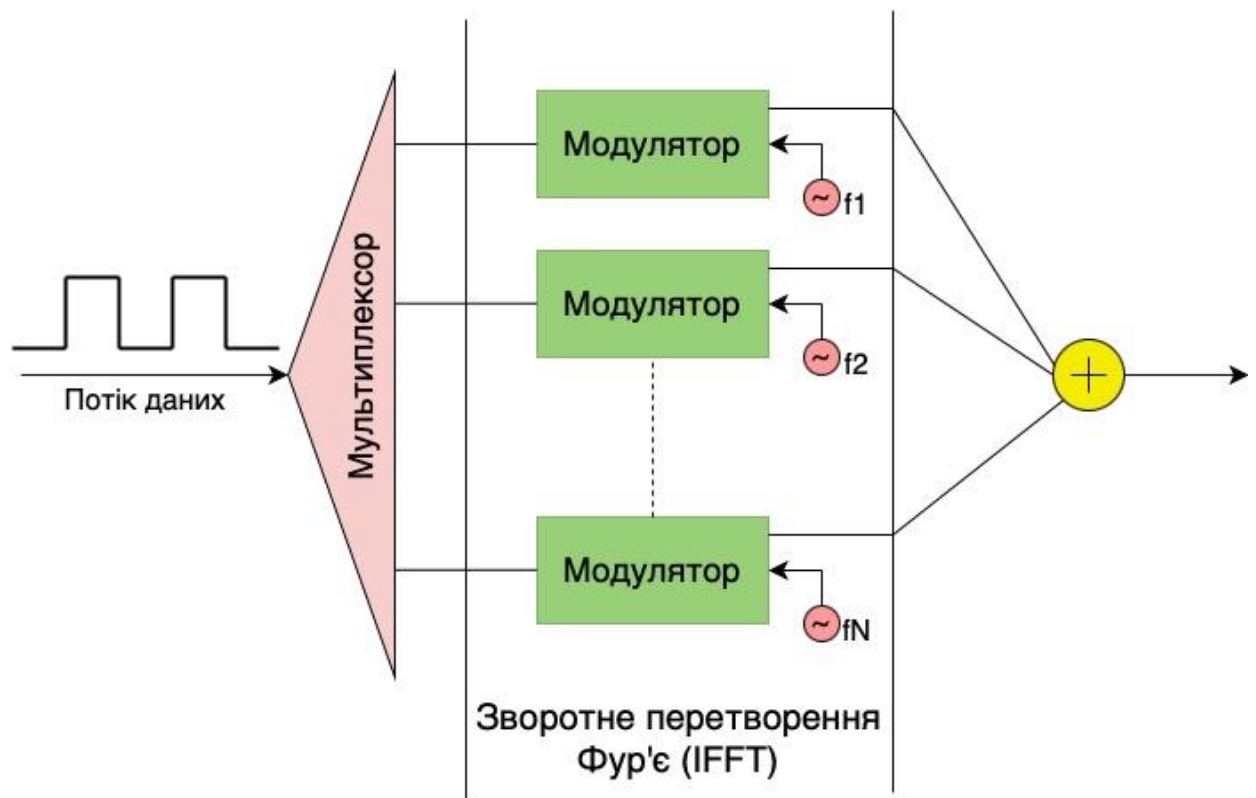


Рисунок 1.1 – Реалізація ортогонального частотного розділення каналів

Метод поділу широкосмугового каналу на ортогональні частотні підканали відомий як ортогональне частотне мультиплексування (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Для його реалізації в передавальних пристроях застосовується зворотнє швидке перетворення Фур'є (IFFT), яке попередньо перетворює мультиплексований сигнал із часового представлення у частотне.

1.1.3 Джерела завад

Існує ряд інших факторів, які можуть спричиняти спотворення переданого сигналу. Серед них – взаємний вплив сусідніх каналів, перешкоди від інших пристроїв, що працюють у тому ж частотному діапазоні, ефект Доплера, електромагнітні завади від працюючих двигунів, розряди статичної електрики тощо. Такі фактори можуть призводити до втрати пакетів, повторної передачі та, як наслідок, до непередбачених затримок у каналі зв'язку. Інтенсивність потоку помилок залежить від потужності джерел перешкод, типу

модуляції, потужності передавача, частотного діапазону та інших змінних, при цьому вона може коливатися з часом.

Результати вимірювань показують, що при швидкості передачі 2 Мбіт/с і використанні квадратурної фазової модуляції QPSK (Quaternary Phase Shift Key) можливі короточасні помилки з ймовірністю $10^{-4} \dots 10^{-2}$. Крім того, періодично виникали ситуації, коли втрати даних сягали 10%, а в деяких випадках – навіть 80% протягом хвилини.

Окрім втрати даних і зниження швидкості передачі, перешкоди в каналі можуть спричиняти проблему «просторової несуперечності». Вона виникає, коли система передає дані в широкомовному режимі без підтвердження отримання, передбачаючи, що всі приймачі отримають однакову інформацію одночасно. Проте через помилки в каналі деякі пристрої можуть отримати спотворені дані. Це особливо критично у випадках, коли широкомовна передача використовується для синхронізації роботи кількох контролерів у технологічному процесі, оскільки будь-яка похибка може призвести до їх розсинхронізації.

Особливістю такого сценарію є те, що загальна ймовірність помилки у системі значно зростає порівняно з ймовірністю помилки в окремому каналі p . Оскільки ймовірність безпомилкової передачі у всій системі дорівнює добутку ймовірностей безпомилкової передачі у кожному з k каналів, загальна ймовірність успішної передачі визначається формулою $(1 - p)^k$. Наприклад, у системі з 8 каналами та ймовірністю помилки в кожному каналі $p = 0,1$ ймовірність безпомилкової передачі становитиме лише 43%.

Такий ефект може бути критичним у сценаріях, коли кілька пристроїв одночасно зчитують показники датчиків. У провідних мережах для цього використовуються широкомовні команди, які гарантовано доходять до всіх пристроїв одночасно. Проте в бездротових мережах ймовірність того, що всі k датчиків синхронно передадуть свої показники, визначається формулою $(1 - p)^k$, що може значно знизити надійність синхронізації.

1.1.4 Інші особливості безпроводних каналів

Безпроводні трансивери не можуть одночасно передавати та приймати сигнал на одному й тому ж каналі. Це пов'язано з тим, що потужність випромінюваного сигналу швидко зменшується з відстанню (1.1). Власний переданий сигнал у багато разів перевищує потужність вхідного сигналу, що призводить до його заглушення. Через це бездротові трансивери не можуть контролювати ефір під час передачі, як це реалізовано, наприклад, у мережах Ethernet. Така особливість унеможлиблює використання методів доступу, заснованих на виявленні колізій.

Крім того, навіть коли власний передавач не активний, виявлення несійного сигналу від інших станцій може бути ускладненим, як показано на рисунку 1.2 [4]. На ілюстрації три кола позначають зони прийому сигналу для станцій А, В і С. Якщо станція А передає дані станції В, то станція С, перебуваючи поза зоною дії А, не чує цей сигнал. Визначивши відсутність активної несійної, станція С може розпочати власну передачу, що призведе до конфлікту, оскільки станція В не зможе коректно прийняти два сигнали одночасно. Такий ефект відомий як «проблема прихованого вузла».

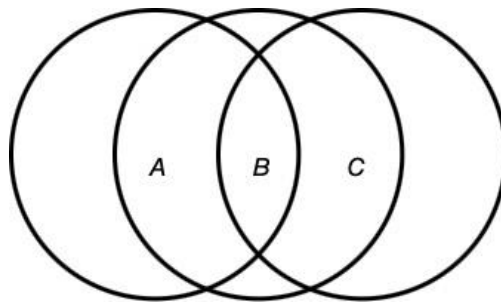


Рисунок 1.2 – Ілюстрація «проблеми схованого вузла»

Для вирішення цієї проблеми можна використовувати спеціальний сигнал «зайнято», який передає станція В. Однак найбільш універсальний підхід запропонований у стандарті IEEE 802.11. Його суть полягає в тому, що станція А перед початком передачі ініціює обмін пакетами, надсилаючи запит на

передачу (RTS – Request To Send). У відповідь станція В може надіслати підтвердження готовності до прийому (CTS – Clear To Send). Тільки після отримання цього підтвердження станція А розпочинає передавати дані. Інші станції, що отримали RTS або CTS, але не є адресатами, переходять у режим очікування.

Недоліком цього механізму є зниження швидкості передачі, оскільки пакети RTS і CTS за розміром можуть бути порівняні з корисними даними.

Це підтверджує, що в бездротових мережах неможливо використовувати метод доступу до каналу CSMA/CD. Натомість застосовується CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – множинний доступ з контролем несівної та запобіганням колізій). На відміну від CSMA/CD, де колізії виявляються та вирішуються після їх виникнення, у CSMA/CA запобігання колізіям є основним завданням. Оскільки приймач не може одночасно передавати й приймати, колізії не можуть бути виявлені напряму, тому використовуються спеціальні механізми для їх мінімізації.

Один із таких механізмів – резервування каналу за допомогою коротких сигналів, що дозволяє зменшити ймовірність конфлікту між довгими пакетами даних. Також перед початком передачі станція інформує всі інші пристрої в мережі про свої наміри, резервуючи ефір на певний час. Додатково використовується механізм випадкової затримки перед передачею після звільнення каналу. Це допомагає знизити ризик одночасного виходу на зв'язок кількох станцій, які чекали на звільнення каналу.

Ще однією важливою проблемою бездротових мереж є енергоспоживання, оскільки такі пристрої часто працюють від автономних джерел живлення. Оптимізація енергоспоживання, подовження терміну служби батарей, розробка методів швидкої заміни або використання альтернативних джерел енергії є актуальними завданнями для забезпечення стабільної роботи бездротових систем.

1.2 Канали з завмираннями

Завмирання сигналу — це явище, яке проявляється у зміні форми його обвідної. Обвідна сигналу являє собою функцію, що формується на основі його характерних точок, таких як екстремуми. Розглянемо її поведінку в умовах багатопроменевого поширення хвиль. Обвідна $U_s(t)$ сигналу $s(t)$ визначається як модуль аналітичного сигналу [8]:

$$U_s(t) = |Z_s(t)| = \sqrt{S^2(t) + \hat{S}^2(t)} \quad (1.2)$$

Під час проходження через радіозв'язкові канали сигнал зазнає різноманітних змін, однією з основних причин яких є багатопроменеве поширення. На шляху від передавача до приймача сигнал відбивається від різних перешкод, утворюючи кілька копій самого себе, але з різними затримками та рівнями загасання. Це і є суть багатопроменевого поширення.

У результаті на приймальну антену одночасно надходять численні електромагнітні хвилі з різними фазами, затримками та амплітудами, що призводить до їх інтерференції та викликає амплітудні й фазові спотворення. Якщо суперпозиція цих сигналів утворює значну за рівнем енергію (що може мати як стабілізуючий, так і завадовий ефект), це збільшує ймовірність помилок і знижує якість каналу зв'язку. Таке явище називається завмиранням сигналу, оскільки він начебто на деякий час перестає передаватися між джерелом і приймачем.

Завмирання поділяються на два типи: швидкі та повільні. Швидкі завмирання виникають унаслідок руху передавача або приймача, а також через наявність перешкод на шляху сигналу. Вони є частотно-селективними, тобто зміна частоти передачі може зменшити або навіть усунути їхній вплив [9].

На рисунку 1.3 схематично зображено багатопроменеве поширення сигналу. Із нього видно, що сигнал може досягати приймача різними шляхами, кожен із яких має власні характеристики:

- $d_1, d_2, \dots$ — довжини траєкторій (відбиті промені сигналу);
- $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ — коефіцієнти загасання сигналів;
- $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ — фази сигналів.

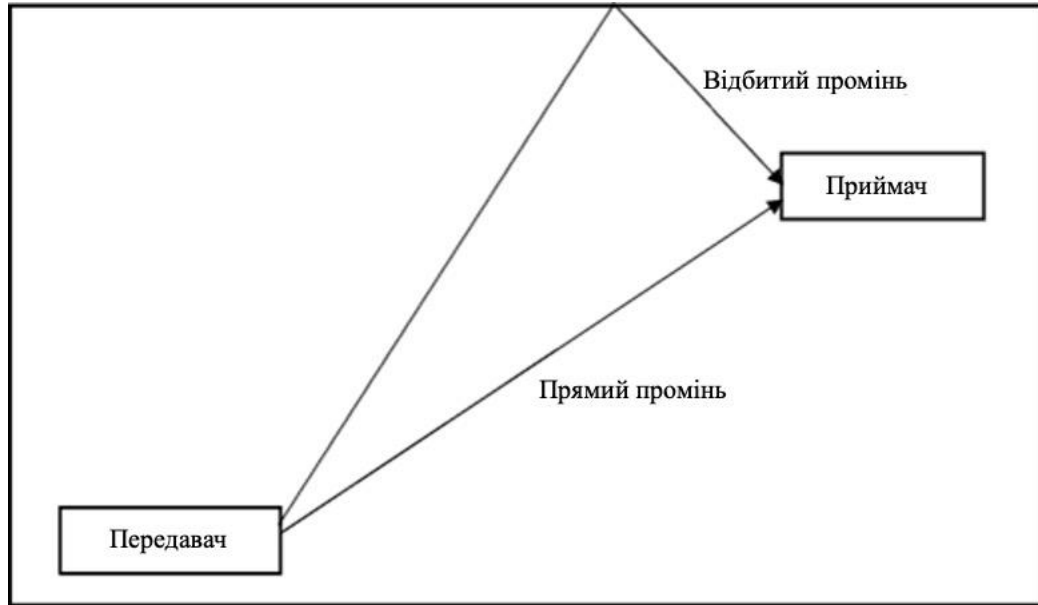


Рисунок 1.3 – Багатопроменеве поширення сигналу

Завмирання сигналу поділяються на два основних типи: завмирання Релея та завмирання Райса.

Завмирання Релея спостерігаються в ситуаціях, коли на приймач не надходить прямий сигнал без затримки, тобто у випадках зв'язку без прямої видимості (NLOS – Non-Line-of-Sight). У таких умовах прийнятий сигнал формується лише внаслідок відбиттів від навколишніх об'єктів. В результаті обвідна сигналу підпорядковується розподілу Релея:

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1.3)$$

де r – амплітуда обвідної вхідного сигналу; σ^2 – середня енергія сигналу.

Завмирання Райса відрізняються тим, що на приймальній стороні присутній прямий промінь з нульовою затримкою. Зміни обвідної у цьому випадку описуються розподілом Райса:

$$p_{Ri}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left[\frac{rs}{\sigma^2}\right], \quad (1.4)$$

де I_0 - модифікована функція Бесселя, а s - амплітуда постійної складової сигналу [8, 9].

1.3 Постановка задачі дослідження

Варто наголосити, що система Wi-Fi є безпроводною телекомунікаційною технологією, через що її робота відбувається в умовах дії великої кількості так званих дестабілізуючих факторів. Частина з них розглянута вище. Але напрямок досліджень стосується питань міжсимвольної інтерференції. Тому найповніше показані механізми поширення сигналів між точкою доступу та користувачами, причини та наслідки взаємодії як сигналів власної мережі, так і сусідніх мереж та різних пристроїв, що використовують такі ж частоти.

Еволюція стандартів 802.11 показує, що переважна кількість нововведень у них стосується саме покращення надійності та ефективності роботи з урахуванням умов багатопроменевого поширення сигналів та їх взаємодії між собою. У стандартах 802.11a/g, які використовували діапазон 5 ГГц, було впроваджено технологію OFDM – мабуть, найбільш вдале технічне рішення для розв’язання проблеми інтерференції сигналів. Згодом з’явилися інші технології та алгоритми. Останні версії стандартів поєднують різні (практично всі) відомі технології, що доводить з одного боку важливість цього питання, а з іншого – намагання досягти більшої ефективності, оскільки кожна технологія «закриває» проблему у своєму напрямку.

Різні технології в Wi-Fi допомагають зменшити міжсимвольну інтерференцію шляхом оптимізації передачі сигналу. Розглянемо у загальному, як технології OFDM, OFDMA, MIMO і Beamforming борються з ISI.

1. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ця технологія передбачає розділення каналу на вузькі підканали (субнесійні), які працюють на низьких швидкостях, що збільшує тривалість символу та зменшує

ймовірність ISI. Використовується циклічний префікс (CP), що додається перед кожним символом, щоб компенсувати затримки від мультишляхового поширення. Має місце мінімізація накладання символів за рахунок ортогональності субнесійних.

Ефективність дуже висока – OFDM є основним методом боротьби з ISI у Wi-Fi 5, 6 і 6E.

2. OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Це розширена та вдосконалена версія OFDM, що дозволяє розподіляти підканали між кількома пристроями, оптимізуючи використання спектра. Завдяки кращому керуванню ресурсами зменшує перевантаження каналу, що може непрямо знижувати ISI. Дозволяє використовувати різні довжини символів і циклічні префікси для різних пристроїв, адаптуючись до різних умов середовища.

Ефективність висока – особливо у Wi-Fi 6 і 6E, де OFDMA покращує ефективність мережі, зменшуючи ризик колізій і спотворень.

3. MIMO (Multiple Input Multiple Output). Використовує кілька антен для одночасного передавання та приймання сигналів, що підвищує стійкість до мультишляхового поширення. Технологія Spatial Multiplexing (просторове мультиплексування) дозволяє передавати різні потоки даних, використовуючи відбиття сигналів як перевагу. Функція Diversity у MIMO (просторове розмаїття) дозволяє вибирати найкращий шлях передачі для мінімізації спотворень.

Ефективність висока – MIMO не усуває ISI напряду, але зменшує його вплив, покращуючи якість сигналу.

4. Beamforming. Фокусується сигнал у напрямку конкретного пристрою, зменшуючи відбиття та багатошляхові ефекти. Знижує можливість інтерференції з іншими пристроями в мережі. Використовується у поєднанні з MIMO для ще більш ефективної передачі.

Ефективність середня – beamforming спрямований на покращення сигналу, концентрує сигнали у потрібному напрямку, зменшуючи рівні

перевідбитих від різних перешкод сигналів та анулюючи при цьому умови для інтерференції.

Тому у Wi-Fi 6 та 6E, у яких спільно використовуються технології OFDMA, MIMO та Beamforming, ISI має значно менший вплив, ніж у старіших поколіннях Wi-Fi.

У даній роботі необхідно більш детально розглянути всі зазначені технології Wi-Fi та проаналізувати їх потенційні можливості у боротьбі з міжсимвольною інтерференцією. Цікаво буде виявити інші можливості цих технологій, наприклад, їх ефективність в умовах значної щільності користувачів як у межах власної мережі, так і у сусідніх мережах.

1.4 Висновки до розділу

Міжсимвольна інтерференція (ISI) у Wi-Fi виникає через те, що сигнали від попередніх символів перекриваються з поточним символом, що призводить до спотворення переданої інформації. Основні причини ISI у Wi-Fi:

- багатопроменеве поширення сигналів, в результаті чого відбувається їх відбиття від стін, меблів, підлоги та інших перешкод, що створює декілька затриманих копій одного і того ж символу;
- обмежена смуга пропускання – через згладжування імпульсів виникає перекриття між символами;
- дисперсія середовища – різні частоти сигналу можуть поширюватися з різною швидкістю, що спричиняє часові затримки.

Найсуттєвішим вважається фактор багатопроменевого поширення (мультишляхового) і саме з урахуванням механізмів цього явища створені та впроваджені відповідні технології.

У стандартах Wi-Fi використовуються переважно три частоти: 2,4 ГГц, 5 ГГц та 6 ГГц (остання впроваджується у Wi-Fi 6E). Особливості ISI на різних частотах:

На частоті 2,4 ГГц має місце велика дальність покриття, але сильне мультишляхове поширення через довші хвилі, більше сторонніх завад (мікрохвильові печі, Bluetooth, пристрої Zigbee), що може посилювати ISI та вужча смуга каналів (20 МГц) збільшує часовий інтервал між символами, що може зменшувати вплив ISI.

На частоті 5 ГГц спостерігається менша схильність до завад, але гірша проникність через стіни, ширші канали (до 160 МГц), що спонукають до зменшення тривалості символів, отже зменшують часовий інтервал між символами, що може підвищувати чутливість до ISI та менша різниця ходу може привести до інтерференційного придушення сигналу через коротшу довжину хвилі.

Частота 6 ГГц дозволяє використовувати найширші канали (до 320 МГц), що ще більше скорочує символи в часі, потенційно збільшуючи ISI. Існує найменше завад, найменший радіус дії, що зменшує мультишляхові ефекти, спільне використання OFDMA та BSS Coloring у Wi-Fi 6E допомагає мінімізувати вплив ISI.

Загалом, ISI більш виражена на високих частотах (5 ГГц, 6 ГГц) через менший часовий інтервал між символами, але завдяки сучасним технологіям її вплив значно зменшується.

2 КОМПЕНСАЦІЯ МІЖСИМВОЛЬНОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ OFDM

2.1 Основні принципи OFDM

Технологія OFDM є методом модуляції, що одночасно використовує множини несучих частот та мультиплексує ортогональні частоти. Незважаючи на те, що ця технологія відома понад 30 років, її популярність значно зросла останнім часом завдяки численним перевагам.

Основна концепція OFDM полягає у розподілі вхідного цифрового потоку, представленого послідовністю бітів (модуючий сигнал), на паралельні підпотоки. Кожен із них передається через окремий канал шляхом модуляції відповідної несучої частоти. Вибір кількості несучих здійснюється так, щоб зменшити швидкість передачі даних на кожній з них. Це дозволяє збільшити тривалість передачі одного символу, що знижує вплив багатопроменевого поширення радіохвиль, характерного для Wi-Fi, і робить сигнал менш чутливим до відбиттів.

На рисунку 2.1 представлено приклад демультимплексування єдиного послідовного цифрового сигналу на п'ять окремих потоків. Це дає змогу збільшити час передачі кожного символу в п'ять разів. Кожен із отриманих сигналів зниженої швидкості модуляції використовується для модуляції відповідної несучої частоти. Для цього застосовують фазову (PSK) або квадратурну амплітудну (QAM) модуляцію.

При виборі несучих частот слід враховувати такі аспекти [10]:

- Кількість несучих повинна забезпечувати достатнє збільшення тривалості передачі одного символу без зміни загальної швидкості потоку даних.

- Частоти несучих мають бути розташовані достатньо близько одна до одної, щоб мінімізувати загальну ширину смуги частот каналу зв'язку.
- Несучі частоти повинні бути ортогональними, що дозволяє уникнути міжканальної інтерференції.

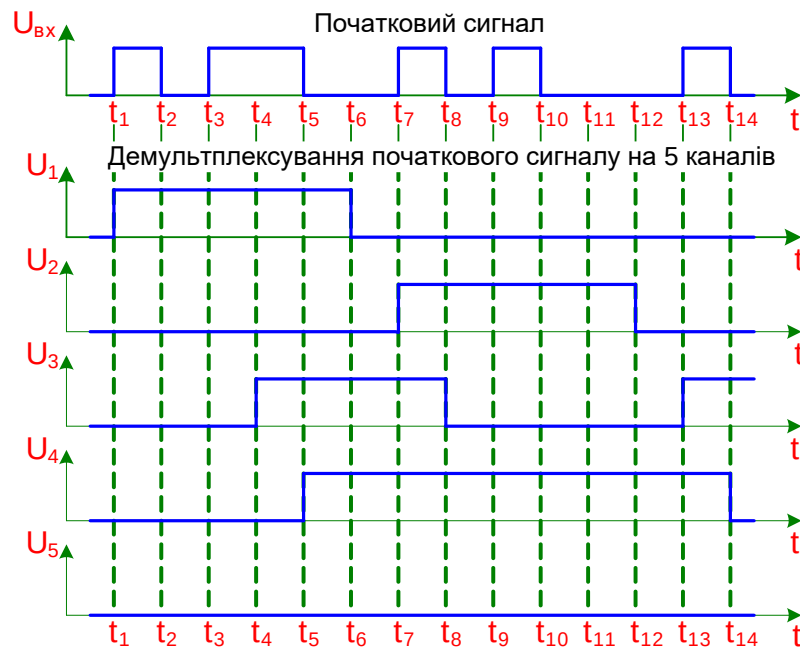


Рисунок 2.1 – Приклад демультимплексування цифрового потоку

Виконання умови ортогональності означає, що скалярний добуток дорівнює нулю, що можна описати за допомогою формули

$$\int_0^T \sin(2\pi f_l t) \cdot \sin(2\pi f_k t) = 0, \quad k \neq l, \quad (2.1)$$

де T – тривалість символу, f_k, f_l – несучі частоти каналів k та l .

Якщо скалярний добуток між піднесійними дорівнює нулю, це означає, що між ними немає взаємодії енергії, а отже, відсутня міжканальна інтерференція. Завдяки більш щільному розташуванню каналів у частотному спектрі, OFDM забезпечує значно вищу спектральну ефективність порівняно з класичними методами частотної маніпуляції.

Суть ортогональності полягає в тому, що спектр кожної несучої після модуляції має нульові значення на частотах, де знаходяться інші несучі. Це

запобігає взаємним завадам і дозволяє незалежно передавати інформацію через кожну піднесійну, усуваючи міжканальну інтерференцію.

На рисунку 2.2 показано спектр окремої несучої, промодульованої сигналом прямокутної форми [10].

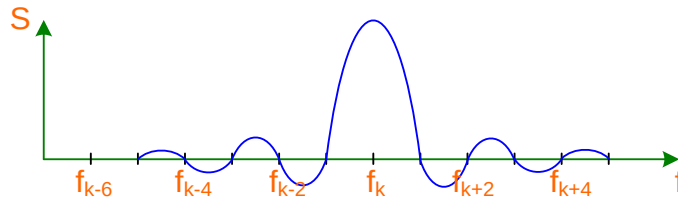


Рисунок 2.2 – Обвідна спектра однієї несійної з номером k при модуляції сигналом прямокутної форми

Частоти несійних, виходячи з умови ортогональності, повинні розташовуватися на осі частот з кроком, оберненим до величини T_s - часу передачі одного символу. При цьому значення кожної частоти визначаються виразом

$$f_k = f_0 + k \frac{1}{T_s}, \quad (2.2)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots, n - 1, N$.

Таким чином, частоти розподіляються рівномірно, а загальний спектр квазігармонійного сигналу наближається до прямокутної форми. Отже, технологія OFDM дозволяє ефективно використовувати частотний ресурс.

На рисунку 2.3 зображено спектр OFDM-сигналу, що складається з N несучих частот. Для запобігання міжканальній інтерференції потрібний правильний вибір значень несучих частот. Вони мають збігатися з точками переходу через нуль спектрів сусідніх несучих, що чітко видно на рисунку 2.3.

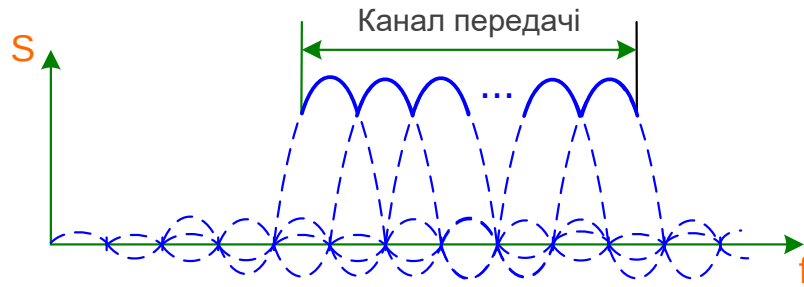


Рисунок 2.3 – Спектр OFDM-сигналу

Структурна схема модулятора OFDM у спрощеному вигляді показана на рисунку 2.4.

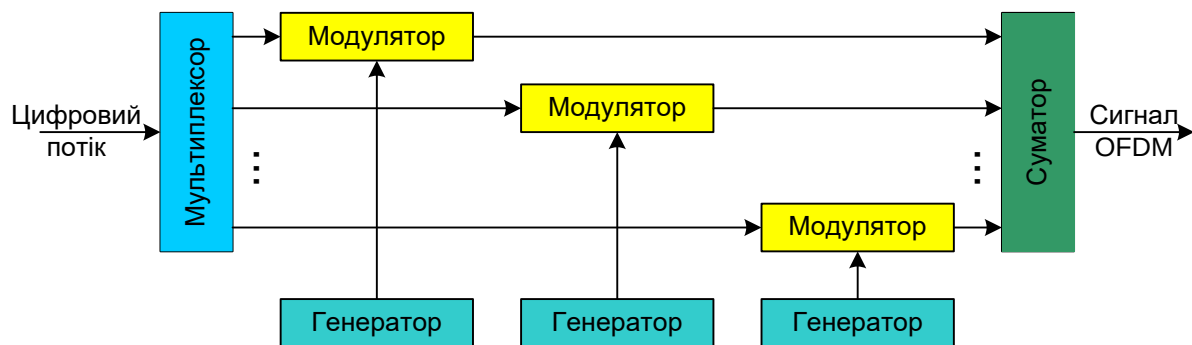


Рисунок 2.4 – Спрощена структурна схема OFDM-модулятора

Несучі частоти можуть формуватися окремими генераторами, що підходить для реалізації OFDM за невеликої кількості несучих. Проте в деяких випадках їхня кількість може сягати кількох тисяч, що ускладнює реалізацію традиційної багатоканальної системи передачі.

Для вирішення цієї проблеми в процесі розробки модулятора було знайдено ефективний підхід, який дозволив уникнути надмірної складності апаратної реалізації. У радіотехніці широко застосовується метод синтезу складних сигналів шляхом комбінування гармонічних складових. Це досягається за допомогою зворотного перетворення Фур'є, яке дає змогу відновити сигнал у часовій області на основі його спектрального складу. Сучасні алгоритми забезпечують швидке виконання цього перетворення з мінімальними обчислювальними витратами.

На рисунку 2.5 представлено приклад формування сигналу OFDM із використанням зворотного швидкого перетворення Фур'є (ЗШПФ).

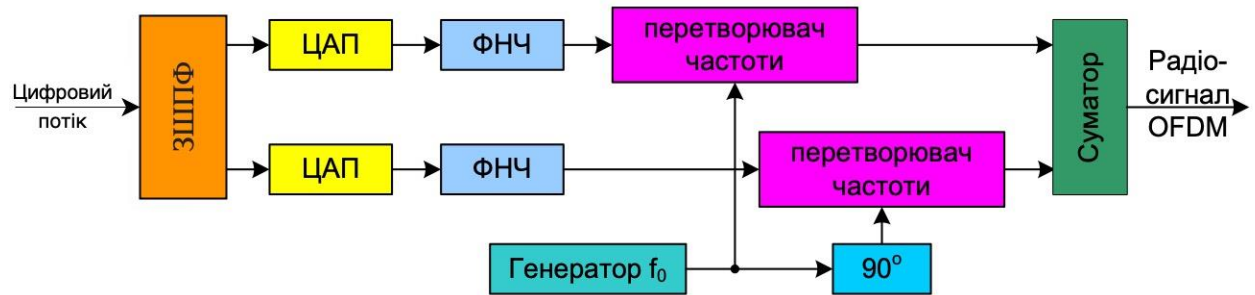


Рисунок 2.5 – Формування OFDM-радіосигналу за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (ЗШПФ)

Після виконання зворотного швидкого перетворення Фур'є (ЗШПФ) отримані компоненти сигналу — дійсна та уявна — проходять через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), а потім через фільтр нижніх частот (ФНЧ) для усунення високочастотних складових. Далі ці сигнали потрапляють у частотний перетворювач, де вони множаться на синфазний і квадратурний гармонічні сигнали частоти f_0 . У результаті формується OFDM-спектр, зсунутий на частоту f_0 , що відповідає необхідному частотному діапазону передачі. На виході суматора отримують OFDM-радіосигнал, який знаходиться на проміжній частоті, що відповідає частоті передавального каналу.

Крім основної функції, дана технологія модуляції також дозволяє підвищити завадостійкість передачі. Оскільки в OFDM одночасно передається інформація через кілька несійних, може виникнути ситуація, коли послідовні символи в часі модулюють сусідні частоти. Це може знижувати стійкість системи до перешкод, що впливають на конкретні діапазони частот (див. рисунок 2.6).

Одним із вдосконалених варіантів є COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex), який передбачає спеціальний алгоритм розподілу символів у часі. У цьому підході символи корисної інформації передаються несійними частотами, вибір яких здійснюється за певною наперед визначеною послідовністю. Ця послідовність ідентична для передавача і приймача, що

дозволяє суттєво зменшити вплив завмирань і перешкод, роблячи передачу даних більш надійною.

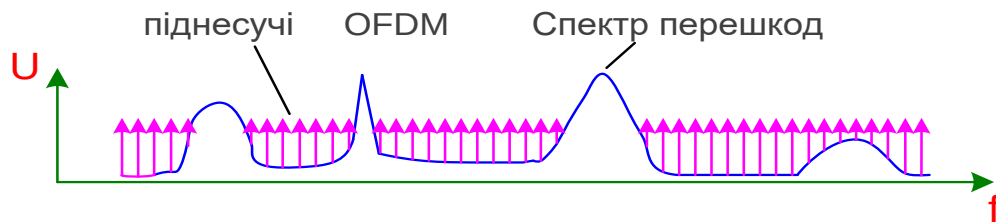


Рисунок 2.6 – Вплив селективної завади при передачі OFDM-сигналу

Однією з особливостей модуляції OFDM є висока нерівномірність рівня потужності групового модульованого сигналу, що виражається у великому пік-факторі. На рисунку 2.7 представлено результат сумування п'яти немодульованих сигналів із різними частотами. Як видно, отриманий сумарний сигнал характеризується значною варіацією амплітуди.

Відношення пікової потужності до середньої потужності в кожному субканалі OFDM-системи визначається типом сигнального сузір'я та коефіцієнтом округлення спектра α , який залежить від використовуваної модуляційної схеми та параметрів формувального фільтра.

Теоретично різниця у значеннях пік-фактора між повним спектром сигналу COFDM та однією несійною частотою становить

$$\Delta(P_M/P_0) = 10 \lg N, \quad (2.3)$$

де N - кількість несійних.

При $N = 1000$ різниця має становити 30 дБ.

Теоретичне значення на практиці може бути досягнуто лише у дуже рідкісних випадках. Мова йде про рандомізацію даних через скремблювання та інші перетворення структури потоку, особливо при великих розмірах сигнального сузір'я.

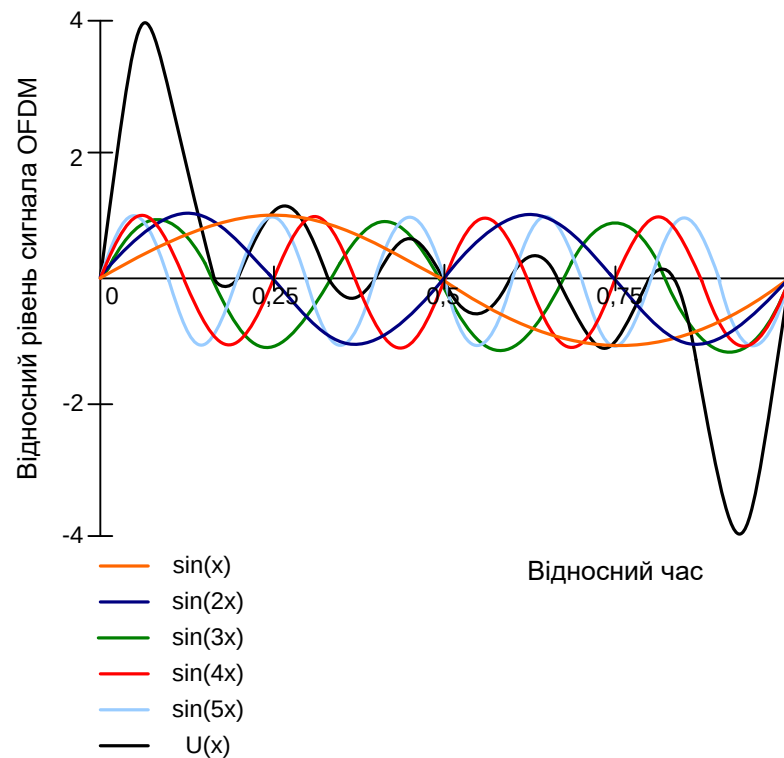


Рисунок 2.7 – Додавання несійних OFDM

Оскільки скрембльований OFDM-сигнал можна розглядати як послідовність незалежних однаково розподілених несійних, то, відповідно до центральної граничної теореми теорії ймовірностей, при великій кількості несійних ($N > 20$) їхній розподіл наближається до гаусового. У такому випадку ймовірність того, що пікова потужність перевищить середню на 9,6 дБ, становить 0,1%, а перевищення на 12 дБ — менше 0,01%.

2.2 Компенсація міжсимвольної інтерференції

У системах, схильних до багатопроменевого поширення радіохвиль, може виникати міжсимвольна інтерференція, яка фактично є перехресним спотворенням сигналу. Механізми цього явища були розглянуті у розділі 1.

Технологія OFDM пропонує ефективне рішення для зменшення такого впливу. Зі збільшенням кількості несійних частот зростає й тривалість одного символу, оскільки збільшується інтервал часу, протягом якого зберігається їхня

ортогональність. Це дозволяє впровадити між передаваними символами так званий «захисний інтервал» (Guard Interval, GI), як зображено на рисунку 2.8.

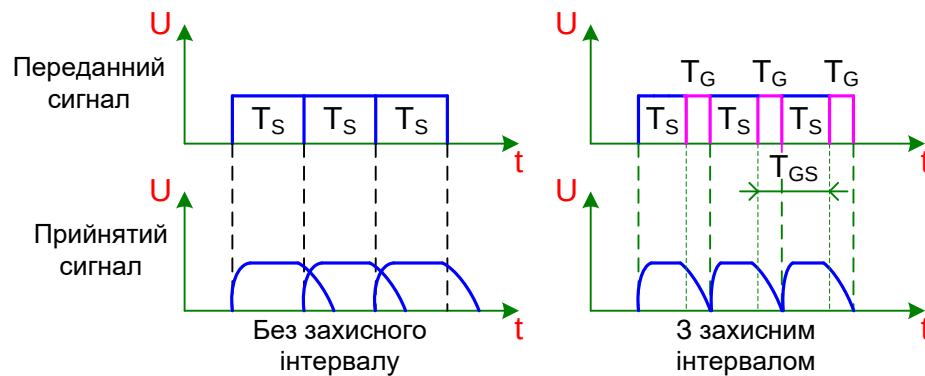


Рисунок 2.8 – Призначення захисного інтервалу при модуляції OFDM

У межах захисного інтервалу передається копія початкової частини символу, ніби зміщена назад у часі. Це подовжує загальну тривалість символу OFDM, оскільки він включає основний та захисний інтервали

$$T_{GS} = T_G + T_S, \quad (2.4)$$

де T_{GS} - час, що витрачається на передачу одного символу;

T_G – захисний інтервал;

T_S – час передачі корисної інформації.

Процес формування повного символу схематично показаний на рис. 2.9.

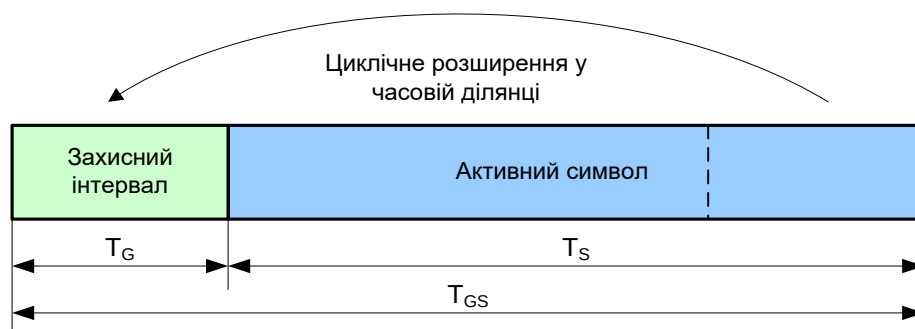


Рисунок 2.9 – Формування повного символу OFDM

Оптимальний вибір тривалості захисного інтервалу дає змогу частково або повністю усунути міжсимвольну інтерференцію. Зазвичай ця тривалість визначається відповідно до умов роботи системи, що робить її адаптивним параметром. На рисунку 2.10 показано часові інтервали для основного сигналу та двох інших, які досягли приймача з різними затримками через більшу довжину їхнього шляху поширення.

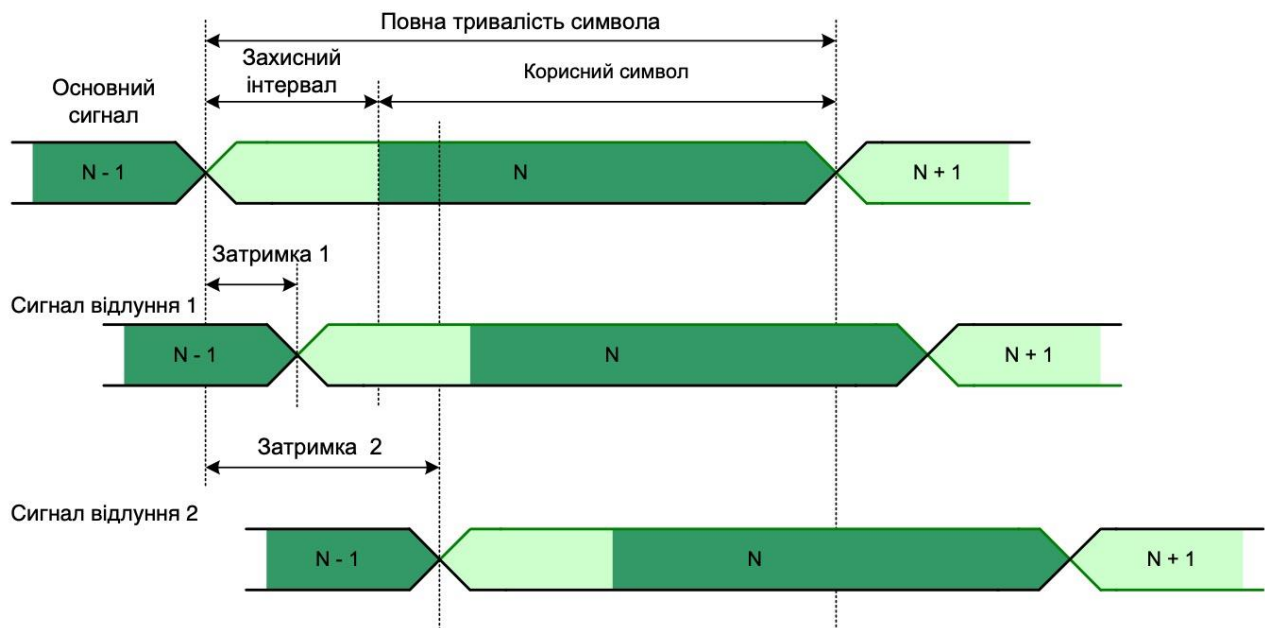


Рисунок 2.10 – Ілюстрація міжсимвольної інтерференції

Як видно з рисунка, затримка першого сигналу відлуння знаходиться в допустимих межах: перехідні процеси між двома символами відбуваються в межах захисного інтервалу основного сигналу, не впливаючи на його корисну частину. Однак другий сигнал відлуння прибув із настільки великою затримкою, що його перехідна зона накладається на корисний фрагмент основного сигналу, що свідчить про недостатній рівень захисту.

На рисунку 2.11 показано, як кілька сигналів відлуння взаємодіють між собою, а захисний інтервал сприяє усуненню спотворень у прийнятому сигналі. Зображення включає основний сигнал, відбиті сигнали відлуння 1 і 2, а також сигнал сусіднього передавача мережі (сигнал відлуння 3).

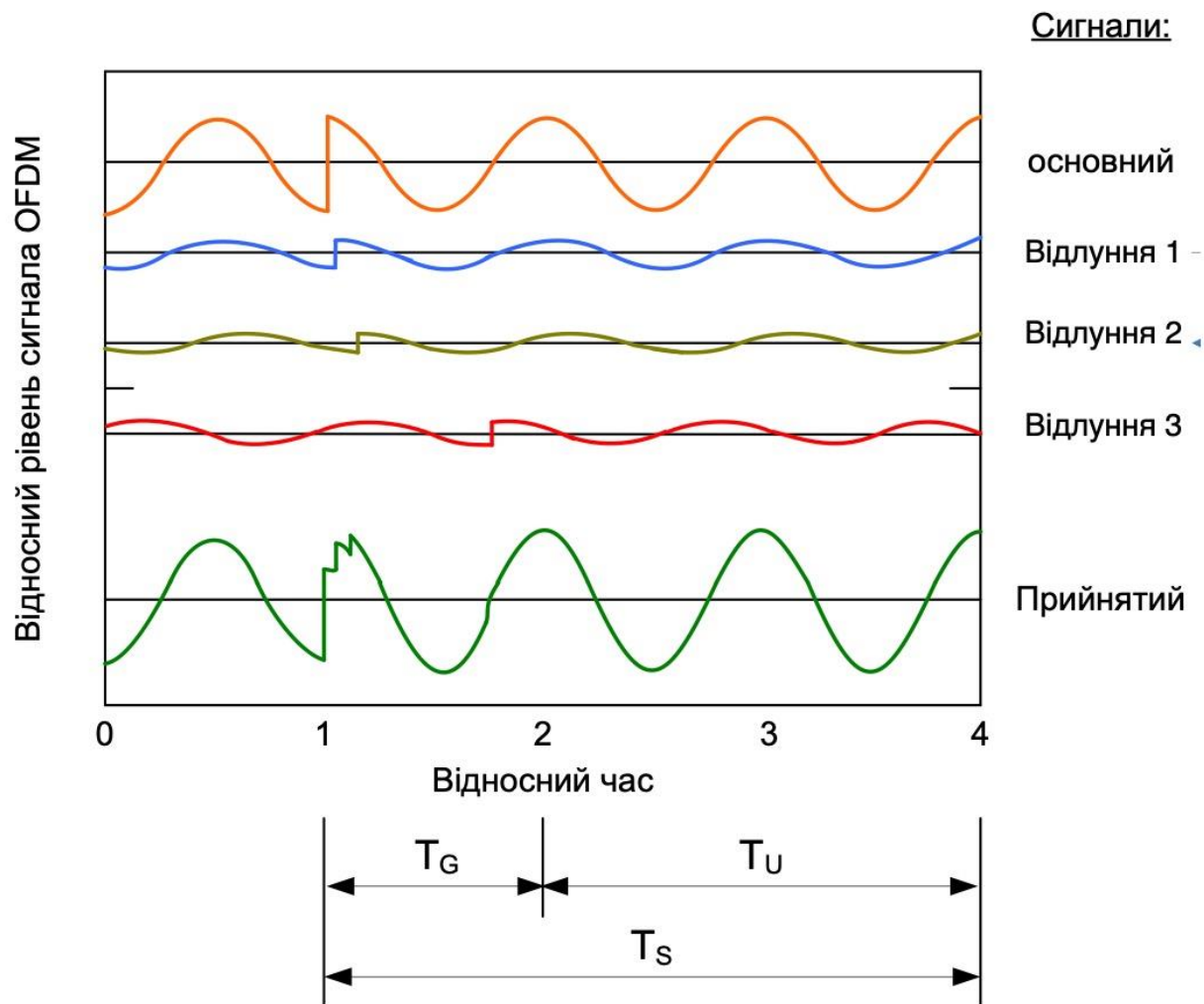


Рисунок 2.11 – Ілюстрація доцільності захисного інтервалу
в OFDM-символі

До приймача надходить сума цих чотирьох сигналів. Якщо тривалість захисного інтервалу T_G перевищує час імпульсної реакції каналу або затримку поширення, міжсимвольна інтерференція (МСІ) значно зменшується, оскільки всі перехідні процеси від небажаних сигналів завершуються в межах цього інтервалу.

Варто зазначити, що навіть за наявності захисного інтервалу інтерференція між несійними все ще може виникати. Оскільки введення захисного інтервалу зменшує пропускну здатність системи, його тривалість зазвичай не перевищує чверті тривалості символу.

Таким чином, зниження швидкості передачі даних на піднесійних частотах дозволяє значно збільшити тривалість символів та додатково використовувати циклічний префікс (CP), що запобігає міжсимвольній інтерференції за умови, що різниця ходу сигналів не перевищує тривалості захисного інтервалу. Завдяки цьому OFDM залишається одним із найефективніших методів боротьби з ISI у стандартах Wi-Fi.

2.3 Висновки до розділу

Наведено основні принципи, які характеризують технологію OFDM і виконання яких у багатьох випадках дозволяє уникнути міжсимвольної інтерференції. Показано, що визначальними факторами технології є збільшення тривалості символів до значень, які перевищують різницю ходу при багатопроменовому поширенні радіохвиль, а також введення захисного інтервалу у структуру OFDM-символу. Введення захисного інтервалу знижує пропускну здатність системи, тому його тривалість зазвичай не перевищує однієї чверті тривалості символу.

Технологія OFDM вважається основним методом боротьби з ISI у Wi-Fi, хоча вона, очевидно, не усуває багатопроменового поширення сигналів і не усуває міжсимвольну інтерференцію – вона лише змінює сигнали випромінювання таким чином, що ця інтерференція стає внутрішньосимвольною і практично не впливає на якість обробки сигналів у приймальних пристроях. Для формування OFDM-сигналу використовується весь вхідний цифровий потік, тому ця технологія не є визначальною стосовно кількості користувачів, які обслуговуються одночасно.

3 МНОЖИННИЙ ДОСТУП З ОРТОГОНАЛЬНИМ ЧАСТОТНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ

3.1 Загальні положення

Технологія OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) є надзвичайно ефективною в мобільних мережах, Wi-Fi і WiMAX. Завдяки раціональному використанню спектра та зниженню завад, вона особливо корисна в умовах високої щільності користувачів, допомагаючи мінімізувати інтерференцію сигналів.

OFDMA розподіляє доступний частотний спектр на кілька вузьких підканалів, що дозволяє кожному користувачеві отримати власний канал зв'язку. Це дає змогу одночасно передавати дані великій кількості користувачів, що підвищує пропускну здатність мережі та зменшує перехресні завади.

У Wi-Fi-мережах з великою кількістю пристроїв зростає ризик колізій і завад. OFDMA усуває ці проблеми завдяки ортогональності частотних каналів: кожен користувач працює в окремому підканалі, що зменшує рівень взаємних перешкод.

Технологія також забезпечує адаптивний розподіл частотних ресурсів залежно від стану каналу та потреб користувачів. Це особливо важливо у динамічних умовах мережі, де якість зв'язку може змінюватися. Користувачі з кращим каналом отримують більше ресурсів, тоді як у складніших умовах доступ розподіляється оптимально для стабільної роботи всієї системи.

При високій мобільності пристроїв OFDMA підтримує стабільність з'єднання завдяки гнучкому перерозподілу підканалів. Це дозволяє зберігати якісний зв'язок навіть за активного переміщення користувачів і змін у топології мережі.

У реальних умовах роботи безпроводні мережі стикаються не стільки з обмеженнями швидкості передачі даних, скільки з проблемами, спричиненими

високою щільністю пристроїв. Це ускладнює досягнення теоретичних показників, оскільки пристрої змушені чекати на звільнення каналу зв'язку, а також зазнають впливу взаємного розташування точок доступу. Розглянемо, як ця проблема вирішується за допомогою сучасних технологій.

Однією з основних труднощів у перевантажених безпроводних мережах є дефіцит спектра. Діапазон 2,4 ГГц вже перевантажений, а в смузі 5 ГГц також спостерігаються труднощі. Це пов'язано з особливостями поширення сигналу, вартістю пристроїв і необхідністю використовувати всі доступні частоти для підтримки зростаючої кількості користувачів. Крім того, нові стандарти Wi-Fi, зокрема Wi-Fi 7, орієнтуються на частоти в районі 6 ГГц, що розширює спектр для передачі даних.

Частотний ресурс можна використовувати по-різному. Один підхід передбачає поділ спектра на широкі канали (до 160 МГц у сучасних стандартах, а в Wi-Fi 7 — до 320 МГц), що забезпечує високу швидкість для невеликої кількості пристроїв. Інший підхід спрямований на створення великої кількості вузьких каналів, щоб мінімізувати взаємні завади між пристроями. Гнучке перемикання між цими підходами визначає універсальність сучасних стандартів зв'язку.

Технологія OFDMA дозволяє ефективно керувати спектром у мережах із високою щільністю користувачів. Вона розширює можливості OFDM, поділяючи частотний канал на піднесійні шириною близько 78 кГц. Передача здійснюється через канали, сформовані з певної кількості піднесійних, кратної 26. Це дає змогу покращити передачу даних і зменшити затримки для кожного користувача.

Завдяки OFDMA канал розбивається на менші частотні підканали, або ресурсні блоки (RU), що дозволяє одночасно передавати дані кільком користувачам. Наприклад, традиційний канал шириною 20 МГц може бути розділений на дев'ять менших підканалів, що дає змогу одному вузлу передавати дані одразу дев'яти клієнтам. Це значно підвищує ефективність

передачі невеликих кадрів, знижує накладні витрати на рівні MAC і скорочує конкуренцію за середовище передачі.

Оскільки OFDMA є вдосконаленою версією OFDM, вона зберігає його переваги у боротьбі з міжсимвольною інтерференцією (МСІ) та додатково зменшує її вплив завдяки збільшенню тривалості символів. Це робить технологію особливо ефективною для перевантажених мереж, забезпечуючи стабільну та швидку передачу даних.

3.2 Ресурсні блоки

При розділенні каналу 20 МГц точка доступу може виділити 26, 52, 106 і 242 піднесійних у ресурсних блоках (RU), рис. 3.1.

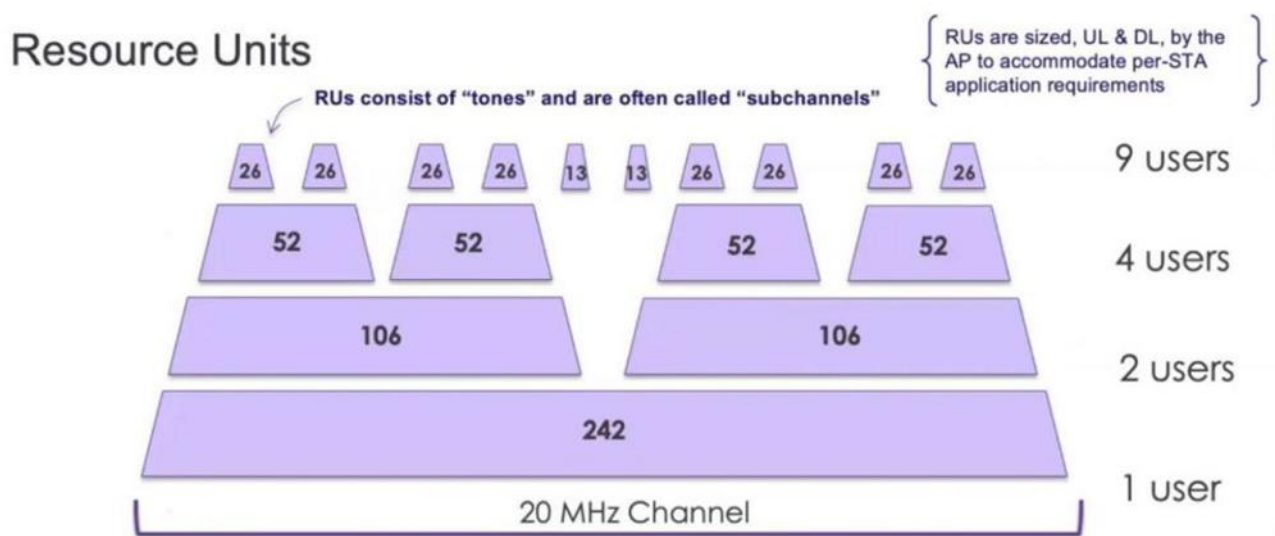


Рисунок 3.1 - Розподіл каналу 20 МГц на ресурсні блоки

Зазначені кількості піднесійних відповідають каналам шириною 2 МГц, 4 МГц, 8 МГц і 20 МГц. Точка доступу (вузол-джерело) визначає, скільки ресурсних блоків (RU) використовуватиметься в каналі 20 МГц, а також може комбінувати їх у різних варіаціях. Наприклад, вона може одночасно передавати дані одному клієнту, використовуючи 8 МГц, а ще двом клієнтам – через

підканали по 4 МГц кожен. Саме в цьому полягає ключова відмінність між OFDM та OFDMA.

Керування ресурсними блоками може здійснюватися по-різному. Наприклад, для простих схем зв'язку достатньо смуги 1,9 МГц, 26 піднесійних і двох пілотних сигналів. Натомість для високошвидкісної передачі даних може знадобитися до 153,2 МГц спектра, 996 тонів і 32 пілотних сигнали.

Ресурсні блоки використовуються для розподілу піднесійних між клієнтами. Точка доступу може призначати їх у межах фіксованих частотних каналів (20, 40, 80, 80+80 або 160 МГц). Кожен ресурсний блок має власну схему модуляції, швидкість кодування та рівень потужності. Крім того, точка доступу керує двостороннім зв'язком, розподіляючи ресурсні блоки в часових інтервалах OFDMA.

У технології OFDM одночасна передача можлива лише для одного користувача, який отримує всі призначені йому піднесійні та часові слоти. Це означає, що доступ до каналу здійснюється за принципом часового поділу. Натомість OFDMA розподіляє доступний частотно-часовий ресурс на менші блоки, що дозволяє декільком користувачам передавати дані паралельно. OFDMA працює як у низхідному, так і у висхідному напрямках, роблячи вузли-джерела та вузли-приймачі рівноправними.

Завдяки гнучкому управлінню групами OFDMA та адаптивному вибору модуляції точка доступу може оптимально налаштовувати швидкість передачі, рівень помилок і затримку для кожного клієнта або потоку трафіку. Це забезпечує значно вищу якість обслуговування (QoS), ніж у попередніх технологіях. Більш того, групи OFDMA не фіксуються за певним користувачем або потоком, а можуть змінюватися з кожним пакетом даних.

Ця гнучкість дозволяє одній точці доступу обслуговувати більше клієнтів одночасно, що критично важливо для мереж із високою щільністю пристроїв та невеликою швидкістю передачі даних. Таким чином, однією з головних переваг OFDMA є значне збільшення кількості підтримуваних клієнтів, що відповідає зростаючим вимогам сучасного Інтернету речей (IoT) та бездротових мереж.

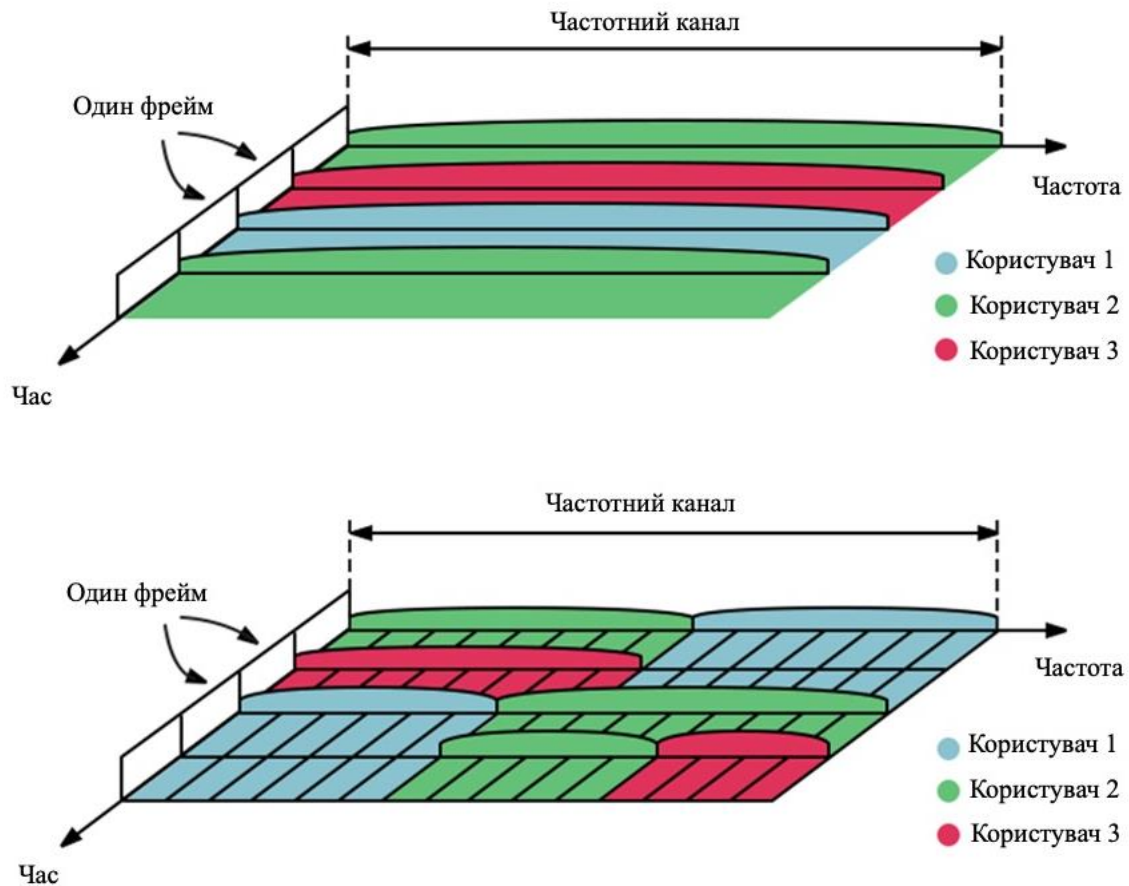


Рисунок 3.2 - Розподіл частотно-часового ресурсу в OFDMA:
зверху – поділ за часом у OFDM, знизу – ресурсні блоки у OFDMA з
локалізованими піднесійними

Множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) ґрунтується на розподілі ресурсних блоків між користувачами за допомогою ортогональних несійних частот. Це дозволяє одночасну передачу даних багатьма пристроями в межах одного радіочастотного спектра без взаємних перешкод. Завдяки ортогональності несійних частот відсутня взаємодія між ресурсними блоками, що запобігає міжсимвольній інтерференції. Кожен користувач отримує унікальну підмножину піднесійних, що дозволяє йому передавати дані паралельно з іншими без створення завад.

OFDMA має низку покращень порівняно з традиційною OFDM, що сприяють ефективному зменшенню міжсимвольної інтерференції. Зокрема, кількість піднесійних у OFDMA значно більша: у каналі 20 МГц OFDM

використовується 64 піднесійні (з шириною кожної 312,5 кГц), тоді як у OFDMA – 256 піднесійних (із шириною 78,125 кГц).

Крім того, тривалість символу в OFDMA збільшена в 4 рази порівняно з OFDM – з 3,2 мікросекунди до 12,8 мікросекунди. Відповідно, пропорційно збільшено і тривалість захисного інтервалу, що додатково знижує вплив міжсимвольної інтерференції та покращує стабільність передачі даних.

3.3 Низхідний та висхідний канали

OFDMA низхідної та висхідної ліній зв'язку є обов'язковими функціями. Вони дуже схожі в роботі: точка доступу обробляє трафік низхідним каналом, передаючи його кільком клієнтам паралельно, рис. 3.3.

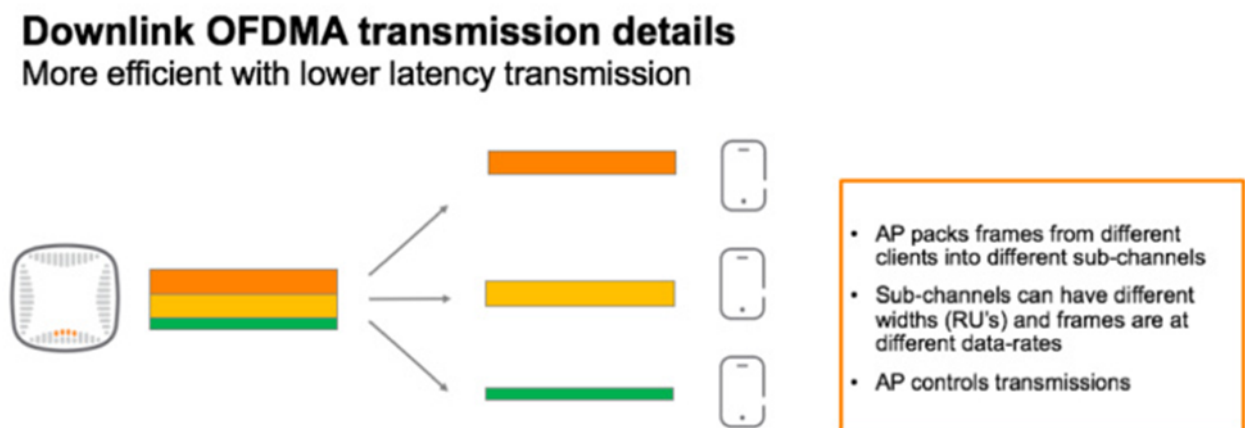


Рисунок 3.3 – OFDMA у низхідному каналі

Доповнення до преамбули допомагають клієнтам визначити, яку групу OFDMA їм слід слухати. У висхідному каналі зв'язку OFDMA кожен клієнт передає дані у власній групі, тоді як точка доступу може приймати сигнали від кількох клієнтів одночасно. Однак управління цим процесом є досить складним.

Точка доступу координує, які клієнти передаватимуть дані в певний часовий інтервал, а також визначає для кожного з них швидкість і потужність

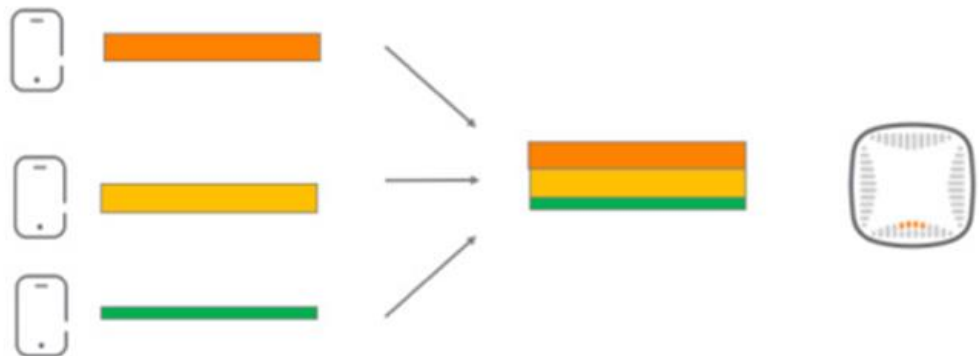
передачі. Для цього вона спочатку отримує інформацію про буфер клієнтів, запитуючи у них відповідні звіти. На основі отриманих даних точка доступу надсилає керуючий кадр у низхідному каналі зв'язку, який визначає структуру наступного кадру висхідного каналу OFDMA (рис. 3.4).

Щоб забезпечити якісний прийом, передача від клієнтів має бути точно синхронізованою за часом і досягати точки доступу з подібними рівнями потужності, що вимагає складного управління. Через це структура багатокористувацьких керуючих кадрів є доволі складною.

Впровадження OFDMA значно покращує мережеву продуктивність у кількох аспектах: зменшуються накладні витрати, збільшується кількість одночасно підключених клієнтів, знижується затримка та джиттер, а також покращується загальна якість обслуговування. Ця технологія докорінно змінює функціональність точки доступу та підвищує її значущість у мережі.

Uplink OFDMA transmission

More efficient with lower latency transmission



- Clients transmit frames simultaneously, in different sub-channels
- AP receives and **demodulates frames in parallel**
- All clients transmit the full-channel header simultaneously
- AP makes the decisions on client-sub-channel allocation

Рисунок 3.4 - Передача OFDMA по висхідній лінії зв'язку

3.4 Висновки до розділу

Технологія OFDMA є версією OFDM для багатокористувальницького доступу, оптимізованою з метою підвищення продуктивності мережі Wi-Fi. Ці технології – OFDM та OFDMA – використовують розбивку даних на кілька невеликих пакетів, що дозволяє ефективно передавати інформацію. В умовах щільної мережі це значно покращує пропускну здатність, оскільки багато користувачів можуть одночасно передавати дані на різних частотних каналах, що підвищує ефективність використання доступного спектра. Частотні канали (ресурсні блоки) використовують ортогональні несійні, що дає можливість уникати впливу міжсимвольної інтерференції та мінімізувати завади між користувачами.

В обох технологіях використання множини піднесійних частот, на кожній з яких передається окремий блок даних, потребує послідовно-паралельного перетворення цифрового потоку. Це вимагає збільшення тривалості сформованого символу, що у свою чергу створює передумови для уникнення міжсимвольної інтерференції як через велику тривалість сигналу, так і через можливість введення захисного проміжку (циклічного префіксу). OFDMA використовує більшу кількість піднесійних, має у 4 рази більшу тривалість символу та захисного інтервалу.

Показано, що на кожній піднесійній може застосовуватися своя схема модуляції залежно від рівня селективної завади, причому це відбувається адаптивно.

В технології OFDMA кількість ресурсних блоків зі своїми піднесійними, призначених для кожного клієнта, визначається залежно від обмежень пристрою, вимог якості обслуговування (QoS) та розміру пакетів. Це дозволяє більшій кількості користувачів отримувати більші обсяги даних із меншою затримкою та меншою ймовірністю погіршення якості сигналу через перенасиченість мережі.

4 ТЕХНОЛОГІЯ BEAMFORMING

4.1 Доцільність формування направленого сигналу у Wi-Fi

Beamforming, або Transmit Beamforming (TxBF), — це технологія формування спрямованої діаграми випромінювання антенної решітки, заснована на принципі інтерференції хвиль. Коли кілька хвиль накладаються одна на одну, у певних напрямках відбувається підсилення сигналу, а в інших — його ослаблення. Ця технологія ефективно реалізується в цифрових антенних решітках шляхом вагової обробки сигналів, що дозволяє динамічно адаптувати спрямованість антен відповідно до розташування клієнтів.

Beamforming є невід'ємною частиною стандарту 802.11n, а починаючи з 802.11ac та 802.11ax, ця функція стала обов'язковою. Завдяки спрямованій передачі радіосигналів бездротовим станціям (STA) покращується сила сигналу (RSIS) і збільшується пропускна здатність мережі.

З появою Wi-Fi 4 (802.11n) технологія MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) у поєднанні з beamforming значно підвищила швидкість передачі даних, яка досягла сотень мегабіт за секунду і більше. MIMO забезпечує швидшу передачу завдяки використанню кількох антен, проте більшість клієнтських пристроїв (STA) мають лише одну або дві антени. Це створює дисбаланс між переданими та прийнятими сигналами.

При передачі сигналу STA на точку доступу (AP) остання може використовувати свою багатоканальну антенну систему для покращення прийому. Однак у зворотному напрямку, якщо AP використовує лише відповідну антену, можливості підсилення сигналу не реалізуються повною мірою. Beamforming вирішує цю проблему, забезпечуючи оптимальний напрямок сигналу та покращуючи RSIS для клієнтських пристроїв, що дозволяє досягати вищих швидкостей передачі.

Для максимально ефективного використання багатоканальних ресурсів у Wi-Fi 5 (802.11ac) була впроваджена технологія MU-MIMO (Multi-User MIMO), яка дає змогу точці доступу одночасно передавати дані кільком клієнтським пристроям (STA), підвищуючи ефективність бездротового з'єднання. MU-MIMO базується на beamforming, оскільки ця технологія дозволяє точці доступу спрямовувати сигнали так, щоб кожен STA отримував лише свій сигнал, мінімізуючи взаємні перешкоди. У стандарті Wi-Fi 6 (802.11ax) можливості MU-MIMO були значно розширені, дозволяючи підтримку ще більшої кількості пристроїв завдяки вдосконаленому beamforming.

Основні переваги Beamforming

Beamforming забезпечує значні покращення у швидкості передачі даних, ефективності використання енергії та розширенні покриття Wi-Fi, особливо в умовах великої кількості підключених пристроїв і високого рівня радіочастотних перешкод.

- Збільшення швидкості передачі – технологія фокусується на конкретному пристрої, концентруючи енергію сигналу в його напрямку, що підвищує швидкість зв'язку навіть на значній відстані.
- Розширення покриття – маршрутизатор може ефективніше передавати сигнал у різних напрямках, забезпечуючи стабільніше покриття в бездротовій мережі.
- Зменшення інтерференції – завдяки спрямованій передачі знижується рівень шуму та взаємних завад між пристроями, що покращує стабільність з'єднання.
- Підвищення потужності сигналу – beamforming дозволяє ефективніше передавати дані на великі відстані, що є критично важливим у складних умовах, наприклад, у великих будівлях або густонаселених районах.
- Покращена якість передачі даних – зменшення помилок, підвищення швидкості та зниження рівня шуму сприяють більш якісному та надійному з'єднанню.

Загалом, beamforming покращує продуктивність мережі, зменшує вплив перешкод і підвищує якість зв'язку.

Обмеження Beamforming

Попри всі переваги, технологія має певні обмеження:

- Вона працює лише з пристроями, які підтримують beamforming.
- Не всі маршрутизатори та клієнтські пристрої сумісні з цією технологією, тому при виборі обладнання важливо перевіряти її наявність.

Beamforming є важливим кроком у розвитку бездротових мереж, який дозволяє підвищити ефективність використання радіочастотного спектра та покращити взаємодію між пристроями.

4.2 Принцип роботи beamforming

Технологію адаптивного формування діаграми спрямованості або спрямованого сигналу (beamforming) іноді називають Transmit Beamforming (Tx Beamforming).

Ця технологія передбачає калібрування сигналів, що випромінюються антенами, таким чином, щоб у зоні прийому абонентського обладнання виникала конструктивна інтерференція (посилення сигналу), а в інших напрямках – деструктивна інтерференція (згасання сигналу). У контексті Wi-Fi під інтерференцією розуміють сигнали, що можуть впливати на інші пристрої, і вона є однією з форм завад.

Прийняті від клієнтських пристроїв радіосигнали допомагають точці доступу визначати місцезнаходження користувачів. Ці дані використовуються мікросхемами точки доступу для розрахунку та створення вузьконаправленого сигналу в бік клієнта. Вищий рівень сигналу (краще значення SNR) сприяє підвищенню швидкості передачі даних.

Завдяки адаптивному формуванню діаграми спрямованості можна точніше калібрувати переданий сигнал у напрямку клієнта, що покращує якість каналу між точкою доступу та користувачем. Покращення каналу включає

зменшення додаткових шляхів поширення сигналу, а отже, і зниження рівня інтерференції, зокрема міжсимвольної.

Формування спрямованого променя дозволяє зосередити сигнал у напрямку передбачуваного місцезнаходження конкретного бездротового пристрою (або групи пристроїв), замість його рівномірного розповсюдження в усіх напрямках. Це підвищує швидкість передачі даних і збільшує зону покриття. Такий підхід особливо корисний для технології MU-MIMO, яка менш ефективно працює з пристроями, що швидко рухаються.

Розглянемо механізм формування спрямованого променя. Припустимо, що користувачі Wi-Fi розташовані на певній відстані від точки доступу. Вона визначає місце розташування кожного приймача на основі його радіосигналу. У нашому прикладі до точки доступу підключено двоє користувачів. Рисунки 4.1 та 4.2 ілюструють роботу мережі без Tx Beamforming. На рис. 4.1 видно, що пасивний клієнт потрапляє в зону конструктивної інтерференції, тоді як на рис. 4.2 в цій зоні опиняється активний клієнт. Таким чином, без застосування алгоритму Tx Beamforming розташування зон конструктивної інтерференції залишається незмінним.

У Wi-Fi використовується мультиплексування з поділом у часі (Time Division Multiplexing, TDM), що означає: у кожен конкретний момент часу передача даних здійснюється лише між точкою доступу та одним із активних клієнтів, тоді як інші клієнти залишаються в режимі очікування.

На практиці рівень сигналу пасивного клієнта майже непомітний, проте на рис. 4.1 його показано для демонстрації принципу роботи Tx Beamforming. Без цієї технології обидві антени точки доступу випромінюють сигнал однаково. Як результат, у просторі утворюються зони конструктивної інтерференції (де сигнали підсилюють один одного) і деструктивної інтерференції (де сигнали взаємно послаблюються). При цьому рівень сигналу залишається стабільним незалежно від того, який клієнт є активним у певний момент часу.

Без Tx Beamforming

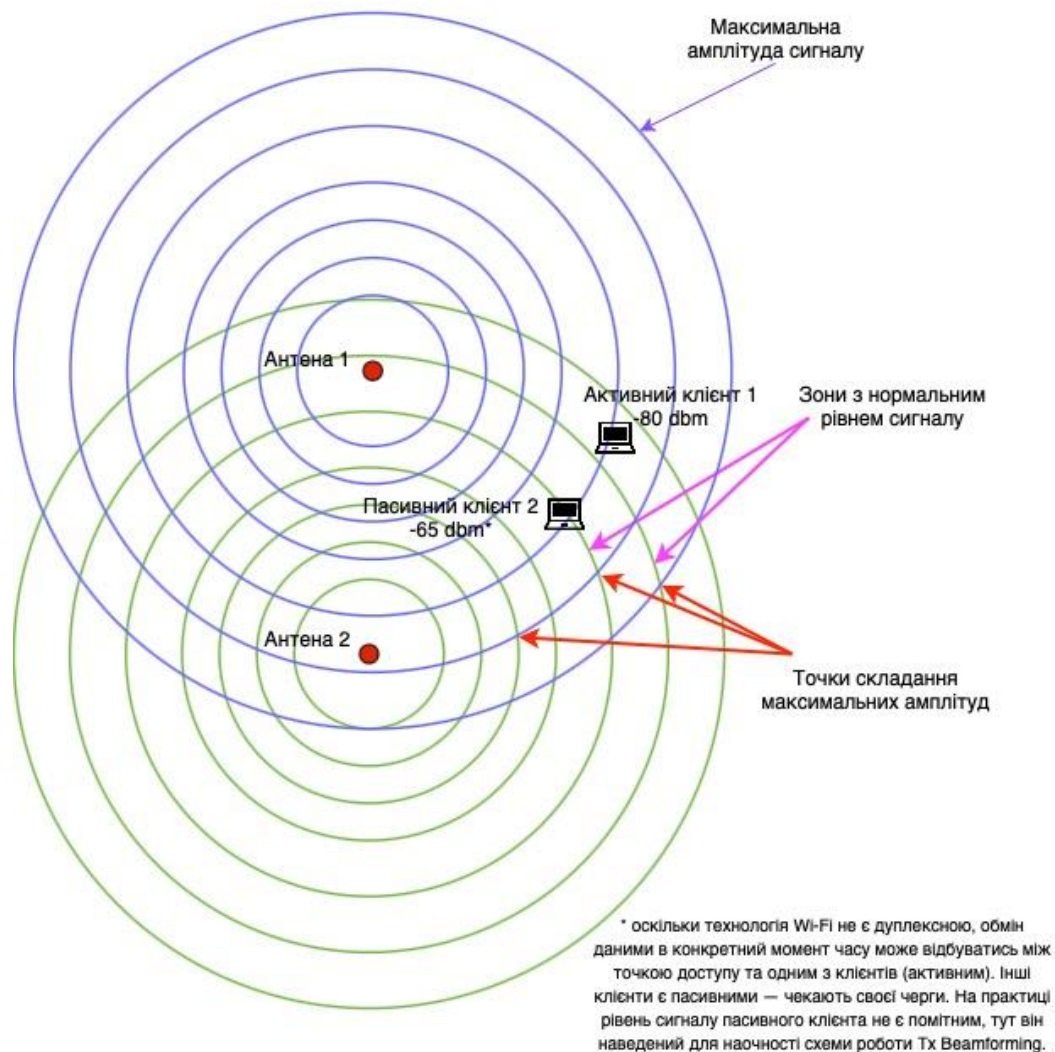


Рисунок 4.1 – Положення користувачів відносно точки доступу (активний користувач у зоні деструктивної інтерференції)

Пояснення до рис. 4.1:

Точка доступу зображена у вигляді двох антен – Антени 1 і Антени 2. Кожна з них має кругову діаграму спрямованості, що представлена у вигляді кіл. Області, де ці кола перетинаються, є зонами конструктивної інтерференції – тут сигнали від обох антен складаються у фазі, підсилюючи один одного. Окремі кола позначають зони максимальної амплітуди сигналу для кожної антени, що відповідає нормальному рівню сигналу.

Без Tx Beamforming

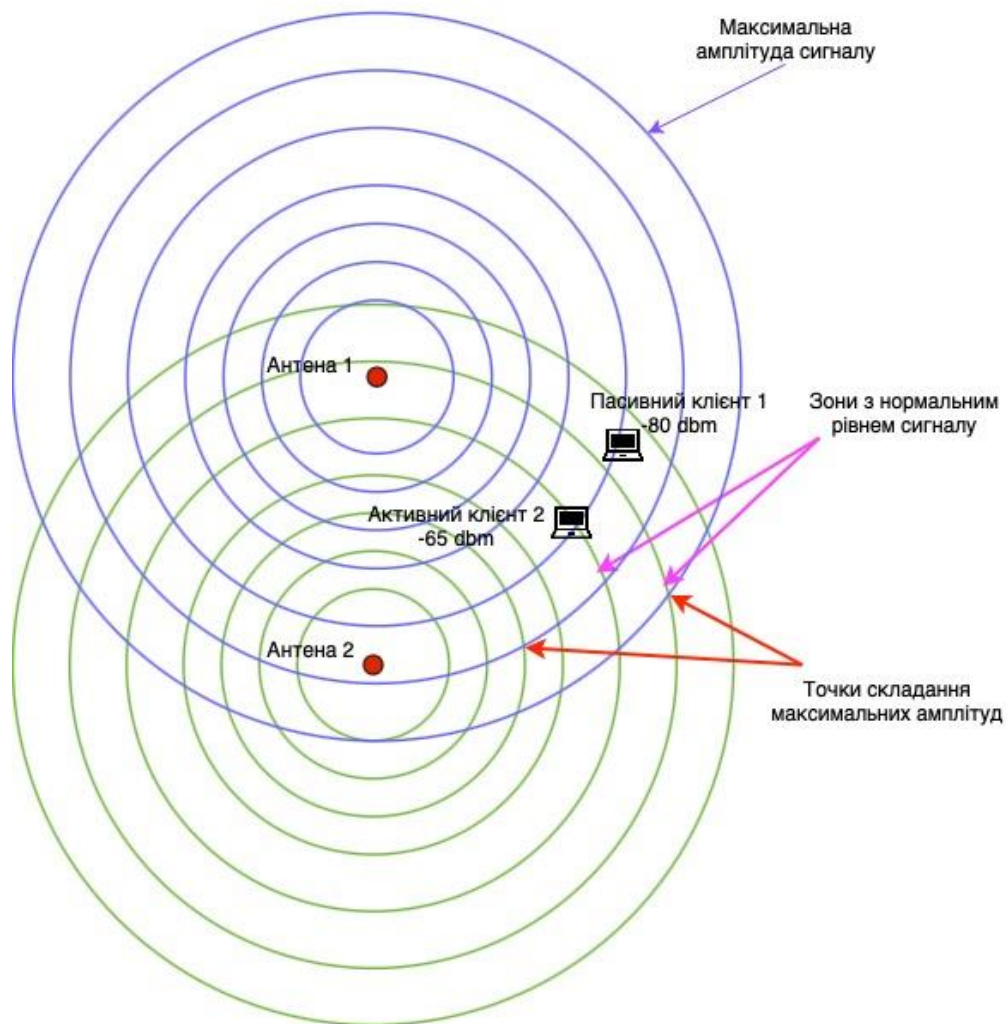


Рисунок 4.2 - Положення користувачів відносно точки доступу
(активний користувач у зоні конструктивної інтерференції)

Рисунки 4.3 та 4.4 ілюструють роботу Tx Beamforming. У цьому випадку одна з антен створює "базові" коливання хвилі, а друга коригує сигнал, змінюючи фазу таким чином, щоб у місці знаходження клієнта амплітуди сигналів обох антен досягали максимуму.

На прикладі, представленому на рис. 4.1, активним є Клієнт 1. Тому фазовий зсув налаштовується так, щоб у його точці розташування сигнали від обох антен підсумовувалися з максимальною амплітудою, що показано на рис. 4.3. Водночас у місці знаходження Клієнта 2, а також у деяких інших зонах,

рівень сигналу знижується. Це сприяє зменшенню загального рівня шуму та підвищенню потужності сигналу для Клієнта 1.

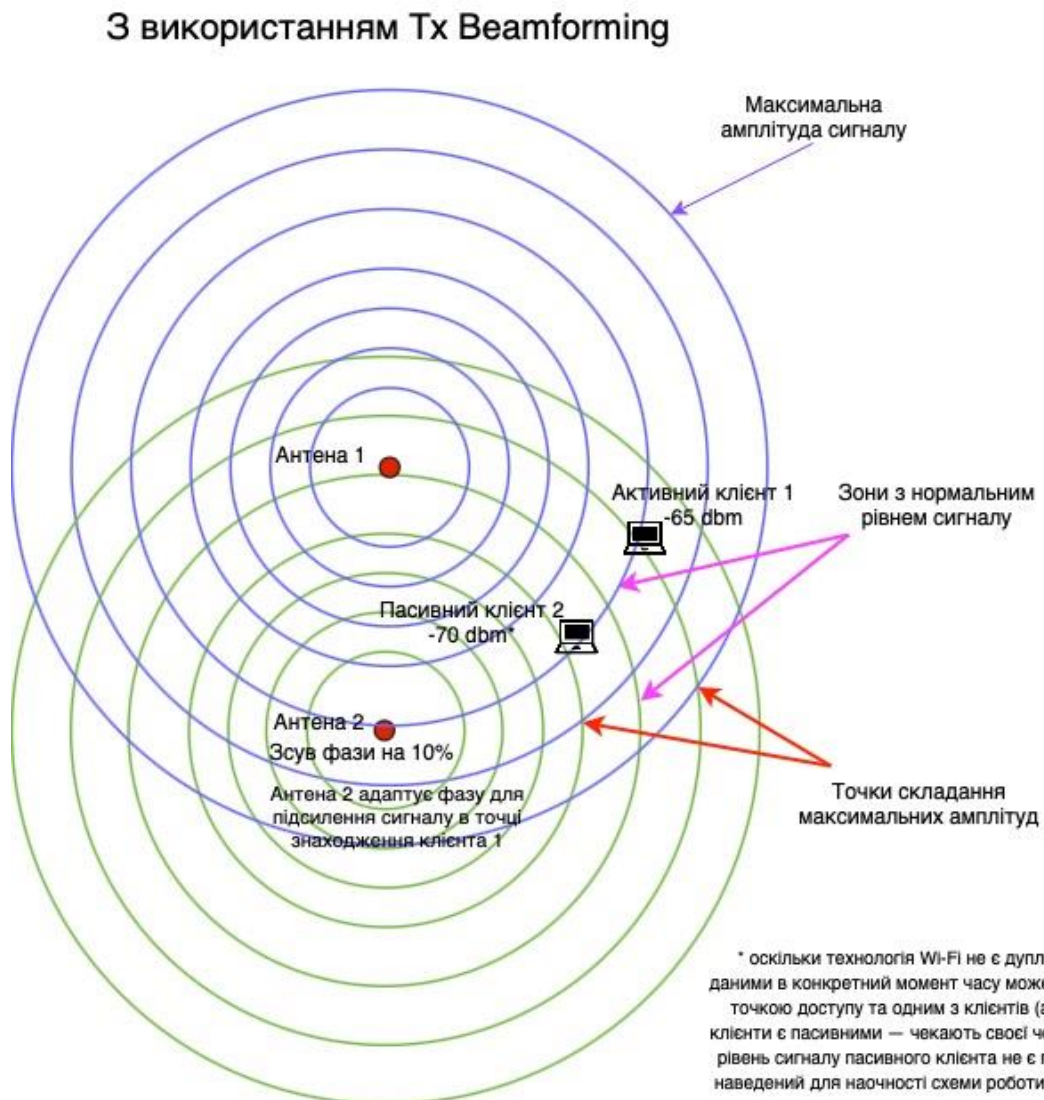


Рисунок 4.3 – Конструктивна інтерференція у зоні активного клієнта 1

Коли активним стає Клієнт 2, Антенa 2 знову змінює фазу сигналу, адаптуючи її таким чином, щоб підсилити сигнал у точці його розташування. Іншими словами, алгоритм Beamforming налаштовує зону Клієнта 2 так, щоб у ній виникала конструктивна інтерференція, що проілюстровано на рис. 4.4.

Для точного калібрування сигналу точка доступу повинна отримати дані від клієнта. Існує два підходи до реалізації Beamforming:

1. Явне формування діаграми спрямованості (explicit Beamforming, eBF) – цей метод використовує спеціальні калібрувальні кадри, які надсилає клієнт. Однак для його застосування клієнтський пристрій повинен підтримувати eBF та повідомити про це точку доступу. Цей варіант реалізований у стандартах 802.11ac та 802.11ax. Увімкнення або вимкнення режиму explicit Beamforming можливе лише для точки доступу в діапазоні 5 ГГц.

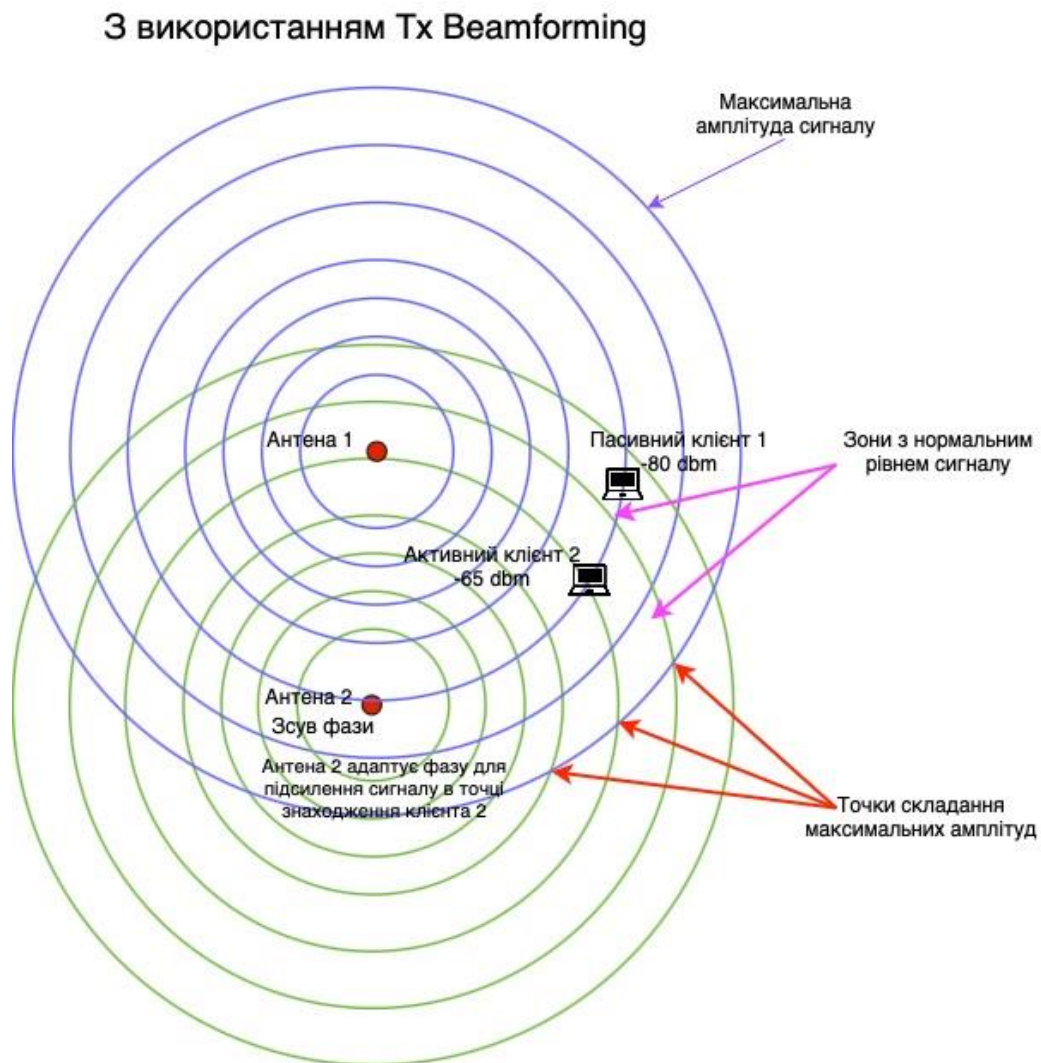


Рисунок 4.4 – Конструктивна інтерференція у зоні активного клієнта 2

Явне формування променя до клієнта (explicit Beamforming) працює лише тоді, коли є підтримка на рівні клієнта й у мережі працює щонайменше два передавача.

2. Неявне формування діаграми спрямованості (implicit Beamforming, iBF) – цей метод використовує службові кадри і не вимагає підтримки eBF на стороні клієнта. Якщо клієнтський пристрій не підтримує explicit Beamforming, можна активувати implicit Beamforming. Це можливо лише через інтерфейс командного рядка (CLI) інтернет-центру за допомогою команди:

Kotlin interface WifiMaster1 beamforming implicit.

Таким чином, технологія Beamforming концентрує радіосигнали на безпроводних станціях (STA) у визначених напрямках, що покращує рівень сигналу (RSIS) і збільшує пропускну здатність клієнтських пристроїв.

4.3 Технологія MU-MIMO-Beamforming

Wi-Fi стандарти були розроблені для підвищення швидкості передачі даних. Починаючи з Wi-Fi 4 (802.11n), який запровадив використання MIMO (Multiple Input Multiple Output) та технології формування променя, максимальна швидкість передачі досягла сотень мегабіт за секунду і навіть перевищила цей показник.

Технологія MIMO дозволяє збільшити швидкість передачі, використовуючи кілька антен для одночасного прийому та передачі даних. Проте на практиці більшість клієнтських пристроїв (STA) оснащені лише однією або двома антенами, що спричиняє різницю у коефіцієнтах підсилення між переданими та прийнятими сигналами. Наприклад, коли STA надсилає сигнал до точки доступу (AP), багатоканальна система AP може покращити прийом завдяки підсиленню сигналу.

Однак цей механізм не працює у зворотному напрямку. Якщо AP надсилає сигнал до STA, а використовується лише така ж кількість антен, що й у клієнта, підсилення багатоканальної системи не застосовується. Для вирішення цієї проблеми була впроваджена технологія beamforming. Вона дозволяє AP та STA узгоджувати вищі швидкості передачі, покращуючи рівень сигналу (RSIS) на стороні клієнта.

Щоб максимально ефективно використовувати мультиантенні ресурси точки доступу, стандарт Wi-Fi 5 (802.11ac) представив технологію багатокористувацького MIMO (MU-MIMO). Вона дає змогу AP одночасно передавати дані кільком STA, підвищуючи загальну ефективність бездротової передачі. Оскільки MU-MIMO залежить від beamforming, технологія формування променя спрямовує сигнали від кількох антен AP так, щоб кожен STA приймав лише свій сигнал, зменшуючи перешкоди між пристроями.

Крім того, стандарт Wi-Fi 6 (802.11ax) ще більше збільшив кількість одночасних користувачів MU-MIMO, що також стало можливим завдяки вдосконаленню технології beamforming.

У специфікації 802.11n передбачено режим SU-MIMO, який дозволяє збільшити швидкість доступу для одного користувача. У стандарті IEEE 802.11ac була впроваджена технологія багатокористувацького MU-MIMO (рис. 4.5). MU-MIMO підтримує до 8 просторових потоків, які можуть розподілятися між 4 точками доступу. Однак для однієї точки доступу встановлено обмеження – не більше 4 потоків. Збільшення кількості просторових потоків порівняно з 802.11n дозволило подвоїти максимальну пропускну спроможність мережі 802.11ac.

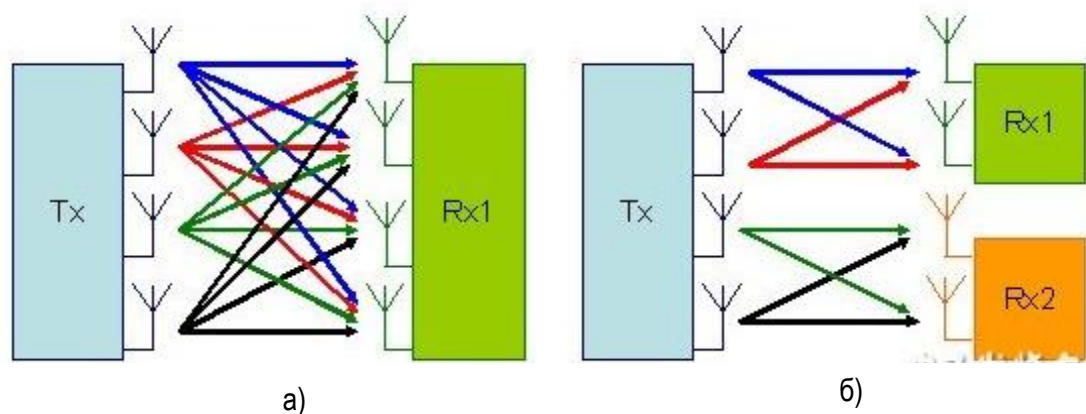


Рисунок 4.5 – Режими SU- і MU-MIMO:

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

Під час проходження через радіоканал просторові потоки об'єднуються в антени: один з них є корисним, тоді як інші створюють перешкоди. Ці завади, спричинені накладанням «чужих» потоків, усуваються за допомогою обробки на приймальному пристрої.

Тепер розглянемо Beamforming-MIMO - технологію формування променя в системах MIMO, яка дає змогу змінювати діаграму спрямованості антени, адаптуючи її під конкретного абонента. Вона дозволяє спрямовувати сигнал у бік передбачуваного розташування бездротового пристрою замість рівномірного розсіювання в усіх напрямках. MU-MIMO-Beamforming ґрунтується на принципах фазованих антенних решіток (ФАР) і дозволяє сфокусувати випромінюваний сигнал у певному напрямку, що сприяє збільшенню дальності та швидкості радіоз'єднання.

Розглянемо роботу точки доступу в режимі формування променя при взаємодії з трьома клієнтськими пристроями (рис. 4.6). Для передачі даних абоненту 1 точка доступу формує потужний вузьконаправлений промінь у його напрямку (синя крива, верхня пелюстка). Водночас енергія променя мінімізується в напрямку абонентів 2 і 3 (що на рисунку 4.6 зображено у вигляді вирізів на синій кривій). Аналогічним чином формуються сигнали для абонентів 2 і 3 (відповідно, червона та жовта криві): максимум випромінювання спрямований на «свого» абонента, а в напрямку інших користувачів енергія зменшується.

Кожен із абонентів (1, 2 та 3) отримує потужний сигнал, який лише незначною мірою спотворюється через накладання сигналів від інших пристроїв. Цей принцип називається «нульове управління», оскільки передбачає контроль положення нулів у діаграмі спрямованості антени для мінімізації взаємних завад.

Реалізація цього механізму в MU-MIMO є досить складним завданням. Вона потребує точних даних про характеристики бездротового каналу зв'язку для кожного абонента. Оскільки ці характеристики постійно змінюються, необхідно регулярно оновлювати інформацію, що потребує додаткових

обчислювальних ресурсів і призводить до додаткових витрат на вимірювання та передачу даних.

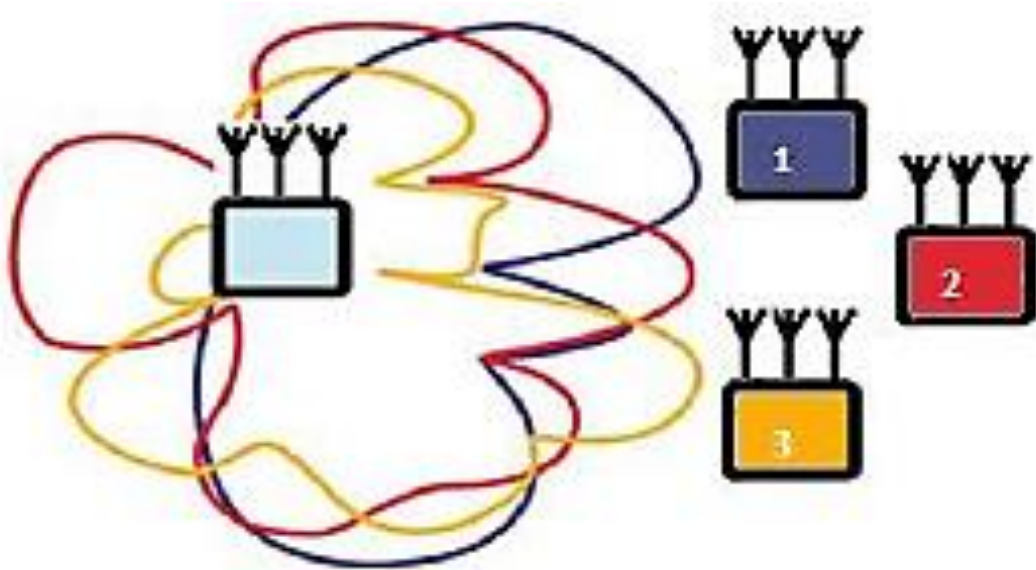


Рисунок 4.6 – Механізм «нульового керування» в MU-MIMO

Одним із недоліків MU-MIMO є залежність швидкості обміну даними від найповільнішого клієнта. Новий потік не може бути переданий жодному з абонентів, доки не завершиться передача для всіх пристроїв у багатокористувацькій групі. Якщо швидкість з'єднання або обсяг переданих даних у клієнтів групи значно відрізняються, ефективність використання бездротового каналу може суттєво знижуватися.

4.4 Висновки до розділу

В умовах багатопроменевого поширення до приймача сигнали потрапляють різними шляхами, що може викликати багатопроменеві ефекти (інтерференція, дифракція). Beamforming дозволяє зменшити вплив таких відбитих сигналів, фокусуючи енергію на найбільш сприятливих шляхах. Крім цього, використання beamforming дозволяє мінімізувати вплив від інших відбитих сигналів або сторонніх джерел шуму, підвищуючи загальну якість зв'язку. У сучасних системах використовується поєднання технологій MIMO-

beamforming, що дозволяє адаптуватися до змін у середовищі (наприклад, до руху приймача або зміни завад) і забезпечити більш стабільний зв'язок.

Beamforming дає змогу зосередитися на певному пристрої, що підключений до мережі, та забезпечити йому сильніший сигнал, зменшуючи втрати сигналу та виключаючи зайвий шум. Це досягається шляхом налаштування напрямку радіохвиль, що відповідає положенню пристрою, та забезпечення індивідуального з'єднання з ним.

5 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КАНАЛУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕХНОЛОГІЇ BEAMFORMING

5.1 Матриці керування

У цьому прикладі показано, як покращити продуктивність зв'язку IEEE® 802.11ac™ (Wi-Fi 5) за допомогою формування передавального променя, коли інформація про стан каналу доступна на передавачі. Формування променя фокусує енергію у напрямку приймача, щоб покращити співвідношення сигнал/шум (SNR) з'єднання. У цій схемі передавач називається формувачем променя (beamformer), а приймач — одержувачем променя (beamformee). Формувач променя використовує матрицю керування для спрямування енергії до одержувача променя. Матриця керування обчислюється на основі інформації про стан каналу, отриманої за допомогою вимірювань каналу. Ці вимірювання отримуються шляхом зондування каналу між формувачем і одержувачем променя. Для зондування каналу формувач променя надсилає нульовий пакет даних (NDP) до пристрою формування променя. Одержувач променя використовує інформацію про канал, отриману в результаті зондування, для обчислення матриці зворотного зв'язку. Ця матриця передається назад до формувача променя у стислому форматі. Потім пристрій формування променя може використовувати матрицю зворотного зв'язку для створення матриці керування та спрямування передач до пристрою формування променя [13]. Процес формування матриці керування показано на рис. 5.1.

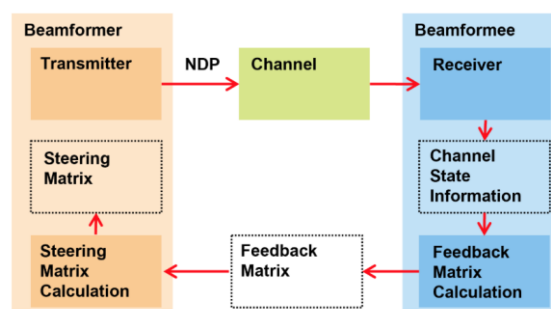


Рисунок 5.1 – Діаграма формування матриці керування

В стандарті IEEE 802.11ac можливість роботи одержувача променя (beamformee) в режимі одного користувача не є обов'язковою. Тому передавач із кількома антенами може використовувати іншу схему для передачі пакетів до приймача, який не може працювати як одержувач променя. Однією з таких схем є просторове розширення. Просторове розширення дозволяє передавати просторово-часові потоки через більшу кількість передавальних антен. Використання просторового розширення може забезпечити невеликий приріст рознесеності передачі в каналах з рівним завмиранням у порівнянні з прямим відображенням просторово-часових потоків на передавальні антени [7].

Розглянемо переваги передавального формування променя для конфігурації MIMO 4x2 між передавачем і приймачем із двома просторово-часовими потоками. Спочатку проілюструємо роботу приймача, який не підтримує функцію beamformee, шляхом вимірювання якості сигналу при передачі з використанням просторового розширення. Щоб показати переваги передавального формування променя, проведемо вимірювання якості сигналу передавання через той самий канал із використанням формування променя і порівнюємо їх між собою. Етапи цього процесу показані на рис.5.2.

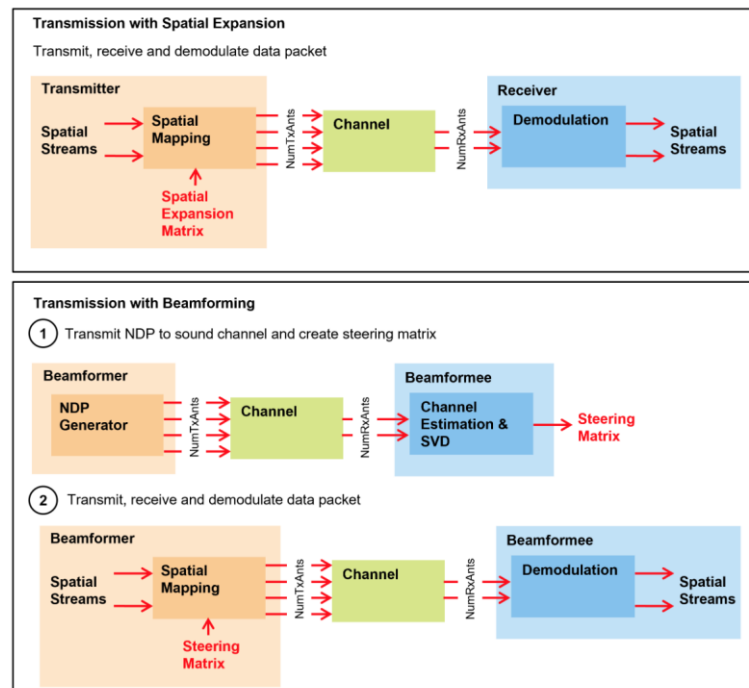


Рисунок 5.2 – Етапи формування променя передачі

Цей приклад моделює конфігурацію MIMO 4x2 із двома просторово-часовими потоками.

```
NumTxAnts = 4; % Number of transmit antennas
NumSTS = 2; % Number of space-time streams
NumRxAnts = 2; % Number of receive antennas
```

Формат специфічної конфігурації VHT-формату задається об'єктом конфігурації VHT. Налаштуємо форму сигналу з смугою пропускання 20 МГц та зазначеною конфігурацією MIMO:

```
cfgVHT = wlanVHTConfig;
cfgVHT.ChannelBandwidth = 'CBW20';
cfgVHT.APEPLength = 4000;
cfgVHT.NumTransmitAntennas = NumTxAnts;
cfgVHT.NumSpaceTimeStreams = NumSTS;
cfgVHT.MCS = 4; % 16-QAM, rate 3/4
```

Використовується модель каналу TGac з профілем затримки Model-B. Реалізація каналу керується початковим значенням (seed) для забезпечення відтворюваності.

```
tgacChannel = wlanTGacChannel;
tgacChannel.DelayProfile = 'Model-B';
tgacChannel.ChannelBandwidth = cfgVHT.ChannelBandwidth;
tgacChannel.SampleRate = wlanSampleRate(cfgVHT);
tgacChannel.NumReceiveAntennas = NumRxAnts;
tgacChannel.NumTransmitAntennas = NumTxAnts;
tgacChannel.TransmitReceiveDistance = 100; % Meters
tgacChannel.RandomStream = 'mt19937ar with seed';
tgacChannel.Seed = 70; % Seed to allow repeatability
```

Шум додається до хвилі у часовій області на виході каналу з потужністю noisePower.

```
noisePower = -37; % dBW
```


Налаштування інших об'єктів і змінних для моделювання

```
% Indices for extracting fields
ind = wlanFieldIndices(cfgVHT);

% AWGN channel to add noise with a specified noise power. The random
% process controlling noise generation is seeded to allow repeatability.
awgnChannel = comm.AWGNChannel;
awgnChannel.RandomStream = 'mt19937ar with seed';
awgnChannel.Seed = 5;
awgnChannel.NoiseMethod = 'Variance';
awgnChannel.Variance = 10^(noisePower/10);

% Calculate the expected noise variance after OFDM demodulation
noiseVar = vhtBeamformingNoiseVariance(noisePower, cfgVHT);

% Number of spatial streams
Nss = NumSTS/(cfgVHT.STBC+1);

% Get the number of occupied subcarriers in VHT fields
ofdmInfo = wlanVHTOFDMInfo('VHT-Data', cfgVHT);
Nst = ofdmInfo.NumTones;

% Generate a random PSDU which will be transmitted
rng(0); % Set random state for repeatability
psdu = randi([0 1], cfgVHT.PSDULength*8, 1);
```

5.2 Моделювання при передачі сигналу з просторовим розширенням

Такий тип передачі може використовуватися передавачем із кількома ненаправленими антенами і приймача, що не підтримує функцію beamformee.

Властивість `SpatialMapping` (просторового розширення) об'єкта конфігурації формату дозволяє вибирати різні схеми просторового відбиття. Щоб використовувати матрицю просторового відбиття, потрібно призначити її до `SpatialMappingMatrix` в об'єкті конфігурації формату. Ця матриця визначає відбиття кожної піднесійної сигналу для кожного просторово-часового потоку на всі передавальні антени.

Розмір матриці просторового відбиття визначається як: $N_{st} \times N_{sts} \times N_t$

де N_{st} – кількість зайнятих піднесійних;

N_{sts} – кількість просторово-часових потоків;

N_t – кількість передавальних антен.

Матриця просторового відбиття дублює деякі просторово-часові потоки для формування потрібної кількості передавальних потоків.

```

% Configure a spatial expansion transmission
vhtSE = cfgVHT;
vhtSE.SpatialMapping = 'Custom'; % Use custom spatial expansion matrix
vhtSE.SpatialMappingMatrix = helperSpatialExpansionMatrix(vhtSE);

% Generate waveform
tx = wlanWaveformGenerator(psdu,vhtSE);

% Pass waveform through a fading channel and add noise. Trailing zeros
% are added to allow for channel filter delay.
rx = tgacChannel([tx; zeros(15,NumTxAnts)]);
% Allow same channel realization to be used subsequently
reset(tgacChannel);
rx = awgnChannel(rx);
% Allow same noise realization to be used subsequently
reset(awgnChannel);

% Estimate symbol timing
tOff = wlanSymbolTimingEstimate(rx(ind.LSTF(1):ind.LSIG(2)),vhtSE.ChannelBandwidth);

% Channel estimation
vhtltf = rx(tOff+(ind.VHTLTF(1):ind.VHTLTF(2)),:);
vhtltfDemod = wlanVHTLTFDemodulate(vhtltf,vhtSE);
chanEstSE = wlanVHTLTFChannelEstimate(vhtltfDemod,vhtSE);

```

Промодельюємо та вирівнюємо поле даних для відновлення символів OFDM для кожного просторового потоку. Результати наведені на рис. 5.3.

```

vhtdata = rx(tOff+(ind.VHTData(1):ind.VHTData(2)),:);
[~,~,symSE] = wlanVHTDataRecover(vhtdata,chanEstSE,noiseVar,vhtSE,...
    'PilotPhaseTracking','None');

```

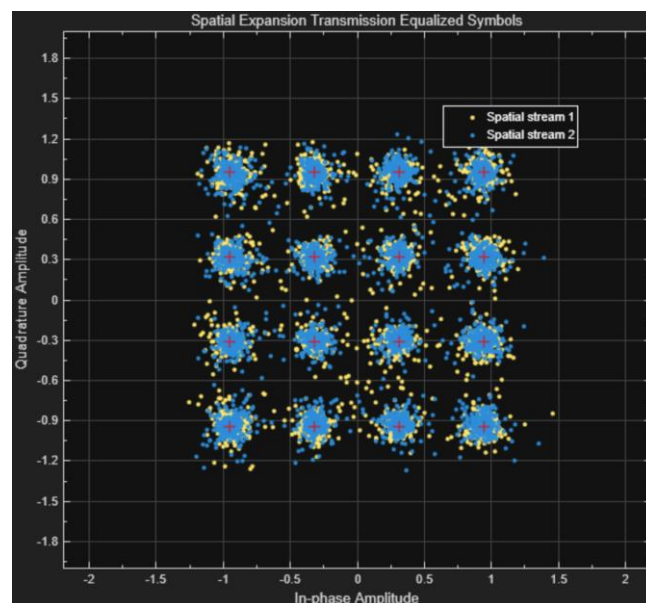


Рисунок 5.3 – Моделювання при передачі сигналу з просторовим розширенням

Дисперсія в групі приблизно однакова для кожного просторового потоку, оскільки SNR приблизно однакові. Це пояснюється тим, що середня потужність у каналі в середньому приблизно однакова для просторово-часового потоку.

```
disp('Mean received channel power per space-time stream with spatial expansion: ')
```

Середня потужність прийнятого каналу на кожен просторово-часовий потік при використанні просторового розширення:

```
for i = 1:NumSTS
    fprintf(' Space-time stream %d: %2.2f W\n',i, ...
        sum(mean(chanEstSE(:,i,:).*conj(chanEstSE(:,i,:)),1),3))
end
```

Просторово-часовий потік 1: 0.73 W

Просторово-часовий потік 2: 0.50 W

5.3 Моделювання при передачі сигналу з формуванням променя

Якщо приймач підтримує функцію beamformee, передача з формуванням променя може створювати вищий SNR порівняно з просторовим розширенням. Цей приклад демонструє перевагу використання інформації про стан каналу для створення та використання матриці керування променем.

```
% Configure a sounding packet
vhtSound = cfgVHT;
vhtSound.APEPLength = 0; % NDP so no data
vhtSound.NumSpaceTimeStreams = NumTxAnts;
vhtSound.SpatialMapping = 'Direct'; % Each TxAnt carries a STS

% Generate sounding waveform
soundingPSDU = [];
tx = wlanWaveformGenerator(soundingPSDU,vhtSound);

% Pass sounding waveform through the channel and add noise. Trailing zeros
% are added to allow for channel filter delay.
rx = tgacChannel([tx; zeros(15,NumTxAnts)]);
% Allow same channel realization to be used subsequently
reset(tgacChannel);
rx = awgnChannel(rx);
% Allow same noise realization to be used subsequently
reset(awgnChannel);

% Estimate symbol timing
tOff = wlanSymbolTimingEstimate(rx(ind.LSTF(1):ind.LSIG(2),:),vhtSound.ChannelBandwidth);
```

Виконаємо оцінку каналу, використовуючи зондувальний пакет, щоб оцінити фактичну частотну характеристику каналу між кожною передавальною та приймальною антеною.

```
% Channel estimation
vhtLLTFInd = wlanFieldIndices(vhtSound, 'VHT-LTF');
vhtltf = rx(tOff+(vhtLLTFInd(1):vhtLLTFInd(2)),:);
vhtltfDemod = wlanVHTLTFDemodulate(vhtltf,vhtSound);
chanEstSound = wlanVHTLTFChannelEstimate(vhtltfDemod,vhtSound);
```

Канал, оцінений за допомогою функції `wlanVHTLTFChannelEstimate`, включає циклічні зсуви, застосовані передавачем до кожного просторово-часового потоку. Видаємо циклічні зсуви, застосовані передавачем, з оцінки каналу, щоб обчислити матрицю формування променя.

```
chanEstSound = vhtBeamformingRemoveCSD(chanEstSound, ...
    vhtSound.ChannelBandwidth,vhtSound.NumSpaceTimeStreams);
```

Цей приклад обчислює матрицю формування променя за допомогою розкладу сингулярного значення (SVD). Він дає дві унітарні матриці U і V , а також діагональну матрицю сингулярних значень S . Перші `NumSTS` стовпці матриці V для кожного піднесучого використовуються як матриця формування променя. Обчислення SVD виконується за допомогою `svd`-функції.

```
chanEstPerm = permute(chanEstSound,[3 2 1]); % Permute to Nr-by-Nt-by-Nst
[U,S,V] = pagesvd(chanEstPerm,'econ');
steeringMatrix = permute(V(:,1:NumSTS,:),[3 2 1]); % Permute to Nst-by-Nsts-by-Nt
```

Застосуємо матрицю формування променя як власну матрицю просторового відображення та використаємо її для передавання даних через той самий канал.

```
% Configure a transmission with beamforming
vhtBF = cfgVHT;
vhtBF.SpatialMapping = 'Custom';
vhtBF.SpatialMappingMatrix = steeringMatrix;

% Generate beamformed data transmission
tx = wlanWaveformGenerator(psd, vhtBF);

% Pass through the channel and add noise. Trailing zeros
% are added to allow for channel filter delay.
rx = tgacChannel([tx; zeros(15,NumTxAnts)]);
rx = awgnChannel(rx);

% Estimate symbol timing
tOff = wlanSymbolTimingEstimate(rx(ind.LSTF(1):ind.LSIG(2)),vhtBF.ChannelBandwidth);

% Channel estimation
vhtltf = rx(tOff+(ind.VHTLTF(1):ind.VHTLTF(2)),:);
vhtltfDemod = wlanVHTLTFDemodulate(vhtltf,vhtBF);
chanEstBF = wlanVHTLTFChannelEstimate(vhtltfDemod,vhtBF);
```

Побудуємо «сузір'я» для кожного просторового потоку, рис. 5.4. Просторовий потік вищого порядку має більшу дисперсію. Це зумовлено впорядкованими сингулярними значеннями каналів, використаними у формуванні променя за допомогою SVD.

```
bfConst = vhtBeamformingPlotConstellation(symBF,refSym, ...
    'Beamformed Transmission Equalized Symbols');
```

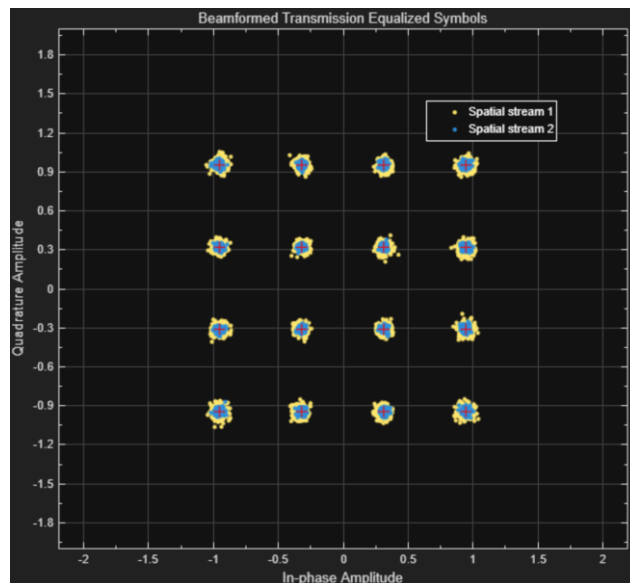


Рисунок 5.4 – Моделювання при передачі сигналу з формуванням променя

Це впорядкування також видно в середній потужності отриманих просторово-часових потоків. Потужність отриманого першого просторово-часового потоку більша, ніж у другого. Це пов'язано з тим, що сила отриманого сигналу є функцією сингулярних значень каналу, які SVD упорядковує в спадному порядку.

```
disp('Mean received channel power per space-time stream with SVD transmit beamforming: ')
```

Середня потужність отриманого каналу на кожен просторово-часовий потік при передавальному формуванні променя за допомогою SVD:

```
for i = 1:NumSTS
    fprintf(' Space-time stream %d: %2.2f W\n',i, ...
        sum(mean(chanEstBF(:,i,:).*conj(chanEstBF(:,i,:)),1),3))
end
```

Просторово-часовий потік 1: 2.08 W

Просторово-часовий потік 2: 0.45 W

Побудуємо «сузір'я» для просторового розширення та передавання з формуванням променя для всіх просторових потоків, рис. 5.5 [9].

```
str = sprintf('%dx%d',NumTxAnts,NumRxAnts);
compConst = vhtBeamformingPlotConstellation([symSE(:) symBF(:)],refSym, ...
    'Beamformed Transmission Equalized Symbols', ...
    {[str ' Spatial Expansion'],[str ' Transmit Beamforming']});
```

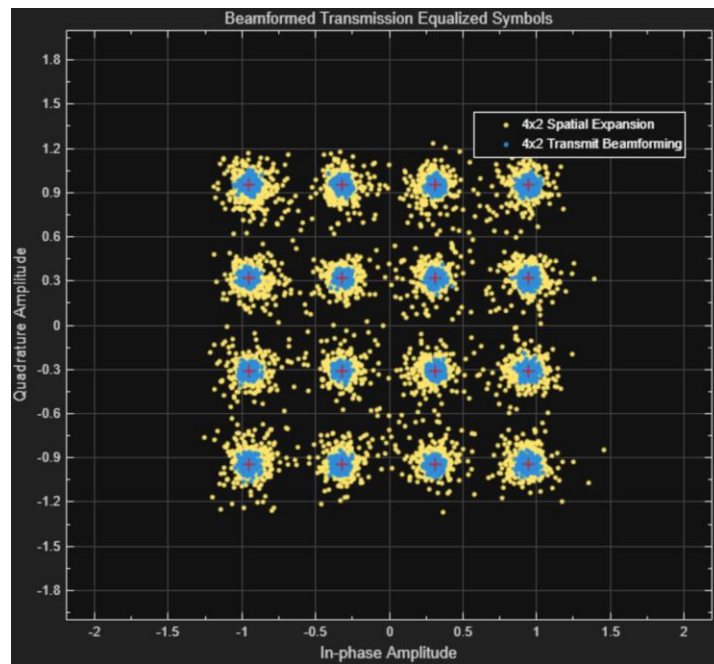


Рисунок 5.5 - Моделювання при передачі сигналу з просторовим розширенням та з формуванням променю

Виміряємо покращення за допомогою середньоквадратичної (RMS) та максимальної величини вектора похибки (EVM). EVM є мірою якості демодульованого сигналу.

```

EVM = comm.EVM;
EVM.AveragingDimensions = [1 2]; % Average over all subcarriers and symbols
EVM.MaximumEVMOutputPort = true;
EVM.ReferenceSignalSource = 'Estimated from reference constellation';
EVM.ReferenceConstellation = refSym;

[rmsEVMSE,maxEVMSE] = EVM(symSE); % EVM using spatial expansion
[rmsEVMBF,maxEVMBF] = EVM(symBF); % EVM using beamforming

for i = 1:Nss
    fprintf(['Spatial stream %d EVM:\n' ...
        ' Spatial expansion:    %2.1f%% RMS, %2.1f%% max\n' ...
        ' Transmit beamforming: %2.1f%% RMS, %2.1f%% max\n'], ...
        i,rmsEVMSE(i),maxEVMSE(i),rmsEVMBF(i),maxEVMBF(i));
end

```

Просторовий потік 1 EVM:

Просторове розширення: 9,2% RMS, 44,8% макс

Формування променя передачі: 2,0% RMS, 8,6% макс

Просторовий потік 2 EVM:

Просторове розширення: 9,2% RMS, 52,3% макс

Формування променя передачі: 4,1% RMS, 12,7% макс

5.4 Висновки до розділу

У даному розділі було показано, що якщо приймач здатний бути формувальником променя (beamformee), то співвідношення сигнал/шум (SNR) може потенційно покращитися, коли передавання здійснюється з формуванням променя порівняно з передаванням через просторове розширення. Збільшення прийнятої потужності при використанні формування променя може призвести до більш надійної демодуляції або навіть дозволити використання більш складної схеми модуляції та кодування для передавання.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Сучасний розвиток бездротових технологій, зокрема мереж Wi-Fi, нерозривно пов'язаний з прагненням до підвищення ефективності та надійності передачі даних. Одним із ключових викликів залишається міжсимвольна інтерференція (МСІ), що суттєво впливає на якість зв'язку. Удосконалення алгоритмів beamforming пропонує перспективне рішення для зменшення МСІ, концентруючи енергію сигналу та підвищуючи пропускну здатність. Проте, впровадження нових технологічних рішень вимагає не лише інженерної досконалості, а й глибокого розуміння та інтеграції принципів охорони праці. Ця робота присвячена не тільки розробці вдосконаленого алгоритму beamforming для зменшення МСІ, але й комплексному аналізу та формулюванню вимог щодо безпеки праці на всіх етапах його проектування, розробки та подальшої експлуатації, забезпечуючи захист здоров'я та добробуту людини.

Під час проектування удосконалення алгоритму beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції на працівника, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [1]: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму; підвищений рівень статичної електрики; підвищена напруженість електричного поля; недостатня освітленість повітря робочої зони; фізичні перевантаження (статичні); нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо покращення умов праці на робочому місці.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

На робочому місці проектувальника удосконалення алгоритму beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції

виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи.

Проектування робочих місць, забезпечених ПК, відноситься до числа важливих проблем ергономічного проектування в області обчислювальної техніки.

Робоче місце і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам. Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця проектувальника повинні бути дотримані наступні основні умови: оптимальне розміщення устаткування, що входить до складу робочого місця і достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення [2].

Головними елементами робочого місця проектувальника є стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоча поза сидячи викликає мінімальне стомлення працівника. Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і постійність розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібне для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Висота робочої поверхні столу для користувачів повинна регулюватися в межах 680-800 мм, при відсутності такої можливості висота робочої поверхні столу повинна бути 725 мм. Модульними розмірами робочої поверхні столу для ПК, на підставі яких повинні розраховуватися конструктивні розміри, слід вважати: ширину 800, 1200, 1400 мм, глибину 800 і 1000 мм при нерегульованій

висоті, що дорівнює 725 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною – не менше 500 мм, глибиною на рівні колін - не менше 450 мм і на рівні простягнутої ноги – не менше 650 мм. Робочий стілець (крісло) повинен бути підйомно-поворотним і регульованим по висоті і кутам нахилу сидіння і спинки, а також - відстані спинки до переднього краю сидіння. Робоче місце необхідно обладнати підставкою для ніг, має ширину не менше 300 мм, глибину не менше 400 мм, регулювання по висоті в межах до 150 мм і по куту нахилу опорної поверхні підставки до 20 градусів. Підставка повинна мати рифлену поверхню і бортик по передньому краю заввишки 10 мм. Клавіатуру слід розташовувати на поверхні столу на відстані 100-300 мм від краю, зверненого до користувача, або на спеціальній регульованій по висоті робочій поверхні, відокремленої від основної стільниці.

Електричний струм – являє собою прихований тип небезпеки, бо його важко визначити в токо- та неструмоведучих частинах устаткування, які є хорошими провідниками електрики. Смертельно небезпечним для життя людини вважають струм, величина якого перевищує 0,05 А, струм менше 0,05 А - безпечний (до 1000 В). З метою попередження уражень електричним струмом до роботи повинні допускатися тільки особи, що добре вивчили основні правила з безпеки виконання роботи.

Приміщення, де експлуатуються ПК, належать до приміщень без підвищеної небезпеки ураження людини електричним струмом. Вимоги електробезпеки і пожежної безпеки у приміщеннях, де встановлені ПК і все устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження роботи їх, електропроводи і кабелі мають відповідати електробезпеці зони та мати апаратуру захисту від струму короткого замикання.

Лінії електромережі ПК, у приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників (заземлення або занулення), причому площі перерізу нульового робочого і нульового захисного провідника повинні бути не менші за площу перерізу фазового провідника.

Відповідно до правил електробезпеки в службовому приміщенні повинен здійснюватись постійний контроль стану електропроводки, запобіжних щитів, шнурів, за допомогою яких включаються в електромережу комп'ютери, освітлювальні прилади, інші електроприлади. Електричні установки, до яких відноситься практично все обладнання ПК, представляють для людини велику потенційну небезпеку, тому що в процесі експлуатації або проведенні профілактичних робіт людина може торкнутися частин, що знаходяться під напругою. Специфічна небезпека електроустановок - струмоведачі провідники, корпуси стійок ПК і іншого устаткування, яка під напругою в результаті пошкодження (пробою) ізоляції, не подають будь-яких сигналів, які попереджають людину про небезпеку. Реакція людини на електричний струм виникає лише при протіканні останнього через тіло людини. Виключно важливе значення для запобігання електротравматизму має правильна організація обслуговування діючих електроустановок ВЦ, проведення ремонтних, монтажних і профілактичних робіт.

Оскільки в приміщенні використовується понад п'ять ПК, тому на помітному місці встановлено аварійний резервний вимикач, який в разі небезпеки повністю знеструмлює електричну мережу (крім освітлення). В такому випадку при використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого або важкогорючого матеріалу дозволено прокладати їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів, що ми і спостерігаємо у приміщенні.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничих приміщень нормується в залежності від теплових характеристик виробничого приміщення, категорії робіт по важкості і періоду року. Категорія виконуваних робіт під час проектування удосконалення

алгоритму beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції - 1а [5] (табл.6.1).

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

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

Для підтримання у виробничих приміщеннях метеорологічних умов, які задовольняють нормативні вимоги використовують систему вентиляції. Приміщення обладнано системою загально обмінної припливно-витяжної вентиляції. На кожен вентиляційну установку складений паспорт з технічною характеристикою та схемою установки.

Крім того, для підтримання температури в холодний період року використовують загальну систему опалення.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Оксид азоту	0,085	0,085	2
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Озон	0,16	0,03	1
------	------	------	---

Під час роботи на ПК важливо, щоб повітря мало певний іонний склад. Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі приміщень з ПК мають відповідати санітарно-гігієнічним нормам (табл.6.3).

Таблиця 6.3 – 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, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення на робочому місці проектувальника є бічне одностороннє.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні (характеристика зорової роботи – дуже високої точності) зазначені у таблиці 6.4:

Таблиця 6.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове

Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	П	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5
-----------------------	-----------------	---	---	---------	---------	------	-----	---	-----	-----	-----

Для максимального використання природного освітлення в приміщенні слід систематично очищувати вікна від пилу та встановити жалюзі. Віконні прорізи не затемнюються іншими будівлями.

Як джерела світла для штучного освітлення в приміщенні застосовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ. Допускається застосування ламп розжарювання у світильниках місцевого освітлення

6.2.4 Виробничий шум

Рівні шуму на робочих місцях визначаються за ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [6] (табл.6.5).

Таблиця 6.5 Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звуку, еквівалентні рівні звуку, дБА/дБАекв.
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творча діяльність, обробка даних,	86	71	61	54	49	45	42	40	38	60

Рівень шуму на робочих місцях не має перевищувати 60 дБА, що досягається застосуванням малошумного обладнання, використанням спеціальних матеріалів для обшивки приміщень, а також різноманітними звукопоглинальними пристроями (перегородки, кожухи, прокладки тощо).

6.2.5. Виробничі випромінювання

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях із ПК (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури,

друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих [7] (табл.6.6).

Таблиця 6.6 – Допустимі параметри 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

Інтенсивність потоків інфрачервоного випромінювання має не перевищувати допустимих значень [4].

Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 0,05 м від екрана та корпусу відео термінала при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинна перевищувати ОД бер/год (100 мкР/год).

Для забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів комп'ютерних випромінювань необхідно застосовувати при екранні фільтри, локальні світлофільтри (засоби індивідуального захисту очей) та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат (згідно Директиви № 90/270/ЕЄС [8]).

6.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а в разі його виникнення запобігається вплив на людей небезпечних факторів пожежі і забезпечується захист матеріальних цінностей. Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі і системою пожежного захисту.

Пожежна безпека приміщення повинна відповідати вимогам Кодексу цивільного захисту України [9] та «Правила пожежної безпеки в Україні» [10].

За вибуховою і пожежною небезпекою приміщення належить до категорії Д, згідно з нормами технологічного проектування «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [11]. У приміщенні знаходяться ПК та інша оргтехніка, що можуть спричинити пожежу.

Згідно даних наведених у таблиці 3.1 будівля, в якій знаходиться приміщення, має II ступінь вогнестійкості [12] приміщення можна віднести до категорії вибухопожежонебезпеки В (табл.6.7).

Таблиця 6.7 – Визначення ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				колонни	сходові площадки, косоури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття міжповерхові (у т. ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні ненесучі	внутрішні ненесучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E15, M0 E30, M1	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Клас приміщення і зон з вибухо- і пожежонебезпеки II-IIa (приміщення, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали.)

6.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Для запобігання виникнення пожежі в приміщенні застосовують такі заходи:

– щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за

пожежну безпеку;

- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;
- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

Електромережі, електроприлади і апаратура експлуатується тільки у справному стані з урахуванням вказівок та рекомендацій підприємств-виготовлювачів. У разі виявлення пошкоджень електромереж, вимикачів, розеток та інших електровиробів слід негайно вимкнути їх та вжити необхідних заходів щодо приведення в пожежобезпечний стан.

6.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, запобігання пожежі, обмеження її розповсюдження, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у разі виникнення вогнища загоряння і в якому зазначено місця розташування пожежної техніки. Як відомо пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин, окислення і джерел запалювання. У робочому приміщенні присутні всі три основні чинники, необхідні для виникнення пожежі. Горючими компонентами є: будівельні матеріали для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін

Джерелами запалювання у ВЦ можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де внаслідок різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри та дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів. У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні дроти, кабелі. При протіканні по них

електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відведення надлишкової теплоти від ЕОМ служать системи вентиляції та кондиціонування повітря. При постійному дії ці системи представляють собою додаткову пожежну небезпеку.

При проведенні обслуговуючих, ремонтних і профілактичних робіт використовуються різні мастильні речовини, легкозаймисті рідини, прокладаються тимчасові електропровідниками, ведуть пайку та чистку окремих вузлів. Виникає додаткова пожежна небезпека, яка потребує додаткових заходів пожежного захисту. Зокрема, при роботі з паяльником слід використовувати неспалену підставку з нескладними пристроями для зменшення споживаної потужності в неробочому стані.

Однією з найбільш важливих завдань пожежної захисту є захист будівельних приміщень від руйнувань та забезпечення їх достатньої міцності в умовах впливу високих температур при пожежі. З огляду на високу вартість електронного устаткування приміщення, а також категорію його пожежної небезпеки, будинки для ВЦ і частини будинку іншого призначення, в яких передбачено розміщення ПК повинні бути 1 і 2 ступеня вогнестійкості.

Для виготовлення будівельних конструкцій використовуються, як правило, цегла, залізобетон, скло, метал та інші негорючі матеріали. Застосування дерева повинна бути обмежено, а в разі використання необхідно просочувати його вогнезахисними складами.

До засобів гасіння пожежі, призначених для локалізації невеликих загорянь, відносяться внутрішні пожежні водопроводи, вогнегасники, сухий пісок, азбестові ковдри і т. д. Застосування води в машинних залах ПК, сховищах носіїв інформації, приміщеннях контрольно-вимірювальних приладів, зважаючи на небезпеку пошкодження або повного виходу з ладу дорогого устаткування можливо у виняткових випадках, коли пожежа приймає загрозливо великі розміри. При цьому кількість води повинна бути мінімальною, а пристрої ПК необхідно захистити від попадання води, накриваючи їх брезентом або полотном.

Для гасіння пожеж на початкових стадіях широко застосовуються вогнегасники. У приміщенні застосовуються головним чином вуглекислотні вогнегасники, перевагами якого є висока ефективність гасіння пожежі, схоронність електронного устаткування, діелектричні властивості вуглекислого газу, що дозволяє використовувати ці вогнегасники навіть у тому випадку, коли не вдається знеструмити електроустановку відразу.

6.4 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

Проведено аналітику роботи Wi-Fi при багатопроменевому поширенні сигналу. Показано, що для таких умов характерна поява внутрішньосимвольної та міжсимвольної інтерференції. Негативний вплив має міжсимвольна інтерференція, оскільки відбувається взаємодія між сигналами, які наділені різними параметрами: амплітудою, фазою, частотою. Стосовно інтерференції, як такої, зазначається, що вона може бути конструктивною (додавання синфазних сигналів) або деструктивною (додавання протифазних сигналів).

У багатьох версіях стандартів Wi-Fi (802.11n, 802.11ac, 802.11ax) передбачені різні технології, які допомагають зменшити міжсимвольну інтерференцію за рахунок оптимізації передавання сигналу. До них відносять OFDM, OFDMA, MIMO і Beamforming. У роботі виконано дослідження цих технологій щодо їх ефективності у боротьбі з міжсимвольною інтерференцією.

Технологія OFDM передбачає розділення каналу на вузькі підканали (субнесійні), які працюють на низьких швидкостях, що збільшує тривалість символу та зменшує ймовірність ISI. Використовується циклічний префікс (CP), що додається перед кожним символом, щоб компенсувати затримки від мультишляхового поширення. Має місце мінімізація накладання символів за рахунок ортогональності субнесійних. Ефективність дуже висока – OFDM є основним методом боротьби з ISI у Wi-Fi 5, 6 і 6E.

OFDMA - це розширена та вдосконалена версія OFDM, що дозволяє розподіляти ресурсні блоки між кількома пристроями, оптимізуючи використання спектра. Завдяки кращому керуванню ресурсами зменшує перевантаження каналу, що може непрямо знижувати ISI. Гнучке управління тривалістю символів та циклічного префіксу мінімізує міжсимвольну інтерференцію. Ефективність висока – особливо у Wi-Fi 6 і 6E, де OFDMA покращує ефективність мережі, зменшуючи ризик колізій і спотворень. При цьому теоретично може обслуговуватися одночасно до 74 користувачів у смузі 160 МГц, в реальних умовах – 20-30 активних пристроїв без значних затримок.

Технологія MIMO-Beamforming поєднує використання кількох антен для одночасного передавання та приймання сигналів, що підвищує стійкість до мультишляхового поширення, та фокусування сигналу у напрямку конкретного пристрою, зменшуючи відбиття та багатошляхові ефекти. При обробці застосовують технологію просторового мультиплексування та функцію Diversity у MIMO (просторове розмаїття), яка дозволяє вибирати найкращий шлях передачі для мінімізації спотворень. Beamforming знижує можливість інтерференції з іншими пристроями в мережі. Ефективність висока – MIMO-Beamforming не усуває ISI напряду, але зменшує її вплив, покращуючи якість сигналу. Завдяки концентрації сигналів у потрібному напрямку зменшуються рівні перевідбитих від різних перешкод сигналів та анулюються при цьому умови для інтерференції.

Wi-Fi 6 підтримує 8×8 MU-MIMO, тобто може одночасно передавати дані 8 клієнтам у висхідному (upload) і низхідному (download) каналах. Beamforming працює з усіма підключеними пристроями, але дає найбільший ефект для 10-15 активних користувачів одночасно.

Технології OFDM, OFDMA, MU-MIMO та Beamforming працюють автоматично, але активуються залежно від ситуації: OFDM, OFDMA – якщо є сумісні пристрої, MU-MIMO – залежно від типу навантаження, Beamforming – завжди, якщо пристрої підтримують.

Показано, що якщо приймач здатний бути формувальником променя (beamformer), то співвідношення сигнал/шум (SNR) може потенційно покращитися. Збільшення потужності вхідного сигналу при використанні формування променя може призвести до більш надійної демодуляції та використання більш складної схеми модуляції.

Виконано розрахунки з питань охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бортник Г. Г. Системи передавання в електрозв'язку. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 138 с.
2. 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.
3. Бойко М.П. Системи стільникового зв'язку: Конспект лекцій. – Одеса: ОНАЗ, 2004. –76с.
4. Ільченко М.Ю. Основи теорії телекомунікацій; навч. посібник; за заг. ред. М. Ю. Ільченка. – К.: ІСЗІ НТУУ «КПІ», 2010. – 788 с.
5. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: Наук. думка, 2008. – 328 с.
6. Т.М. Наритник, С.О. Осипчук, Л.О. Уривський Особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології Wi-Fi для побудови телекомунікаційних систем терагерцового діапазону // Електронне наукове фахове видання «Проблеми телекомунікацій». №2 (17). 2015.
7. Costas.J.P.”Synchronous communications proceedings of the IRE”, Vol.47, p.p.2058-2068, 1959.
8. Marc Stebber J. PSK Demodulation (Part 1), WJ Communications, Inc,2001.
9. Kikkert C.J. Digitally demodulating binary phase shift keyed data signals, In Practice, Canberra, 1999.
10. Поширення земних радіохвиль та мобільний зв'язок [текст] / Л. М. Логачова, Т. І. Бугрова / Навчальний посібник. –Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. –236 с.
11. Зюбіна Р. В. Ширококутові бездротові технології / Р. В. Зюбіна, Ю. П. Бойко // Наукоємні технології: науково-технічна конференція студентів та молодих учених, 11–15 листопада 2013 р. — К. : НАУ, 2013. — С. 29.

12. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навчальний посібник / Є.М. Чернихівський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 272 с.

13. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Полігенько О.О. Експериментальні дослідження пропускну здатності мереж стандарту IEEE 802.11n //Наукоємні технології. – 2013. – № 4 (20). – С.377-383.

14 Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології : підручник Частина 2, за загальною редакцією проф. В.В. Поповського - Х:ТОВ “Компанія СМІТ”, (Ч.2).–.2010. – 470 с.

15. Маньшін І.С., Хачіров Е.Ф. Методи застосування програмноконфігурованого радіо у системах мобільного зв'язку / І.С.Маньшін, Е.І. Хачіров // Матеріали шостої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку EMC2020». – Харків, ХНУРЕ. Том 4. – 2020. – с. 72-74

16. Системи і технології цифрового телебачення: навчальний посібник / В.А. Лошаков, Т.М. Наритник, С.О. Сабурова та ін. ; за заг. ред. проф. В.А. Лошакова. — К.: Талком, 2022. — 285 с.

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

18. Поповський В. В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, В. Ф. Олійник та ін.]. – Харків : СМІТ, 2006. – 564 с.

19. Стеклов В. К. Оптимізація параметрів багатоканальних модемів / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, О. І. Чумак // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2002. – №2. – С. 124-131.

20. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – Київ : Техніка, 2002. – 792 с.

21. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с

22. 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

23. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с

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

25. 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>

26. 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>

27. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>

28. Директива № 90/270/ЕЄС «Про мінімум вимог безпеки і гігієни праці при роботі з екранними пристроями - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/provisions-on-workload-ergonomical-and-psychosocial-risks/osh-directives/5>

29. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI

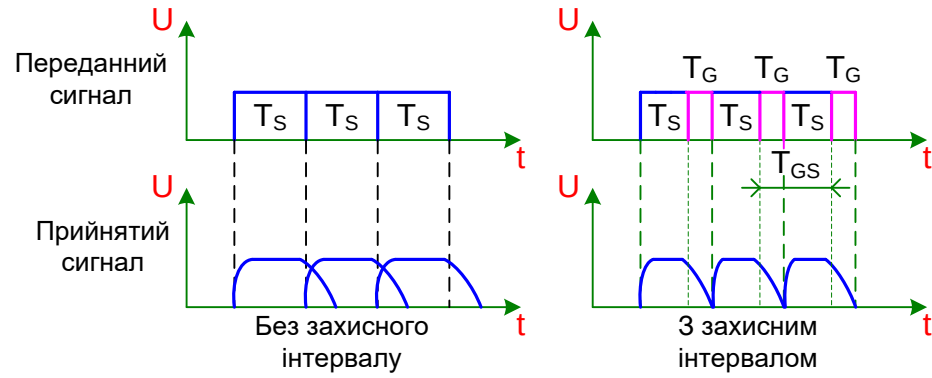
30. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

31. 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.

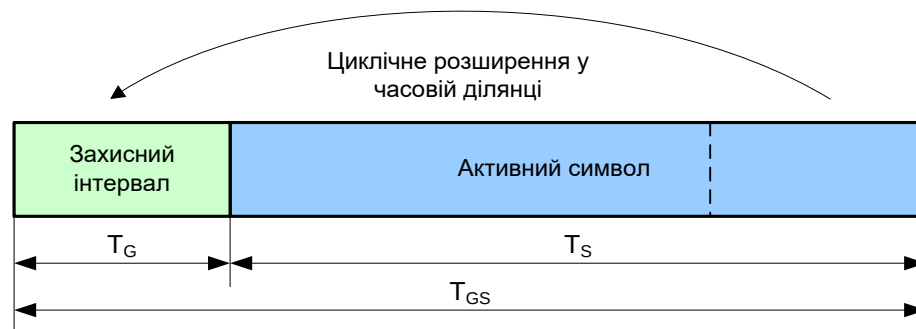
32. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-200

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ BEAMFORMING У МЕРЕЖАХ Wi-Fi
ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ МІЖСИМВОЛЬНОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

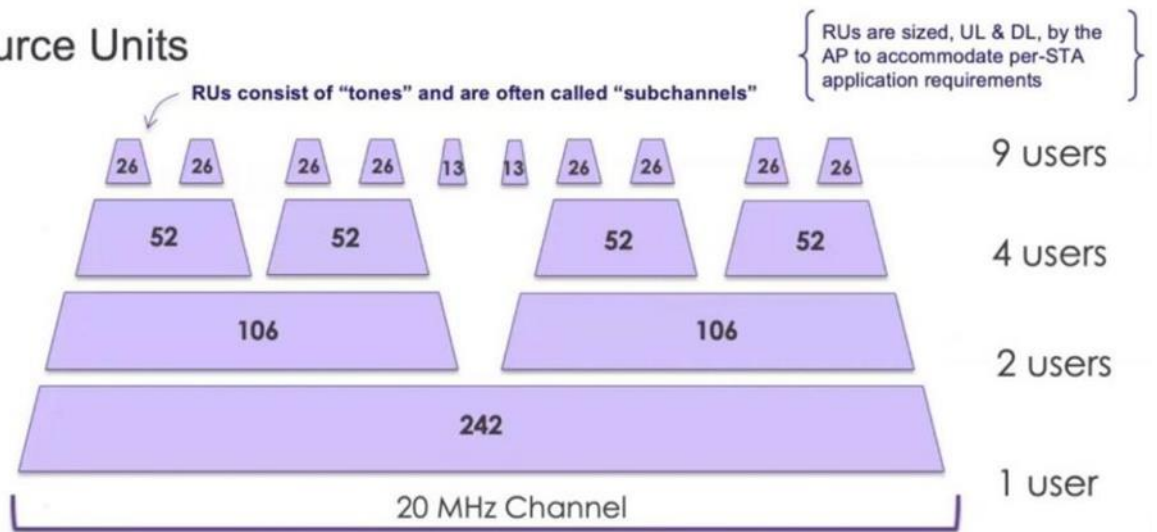


Призначення захисного інтервалу при модуляції OFDM



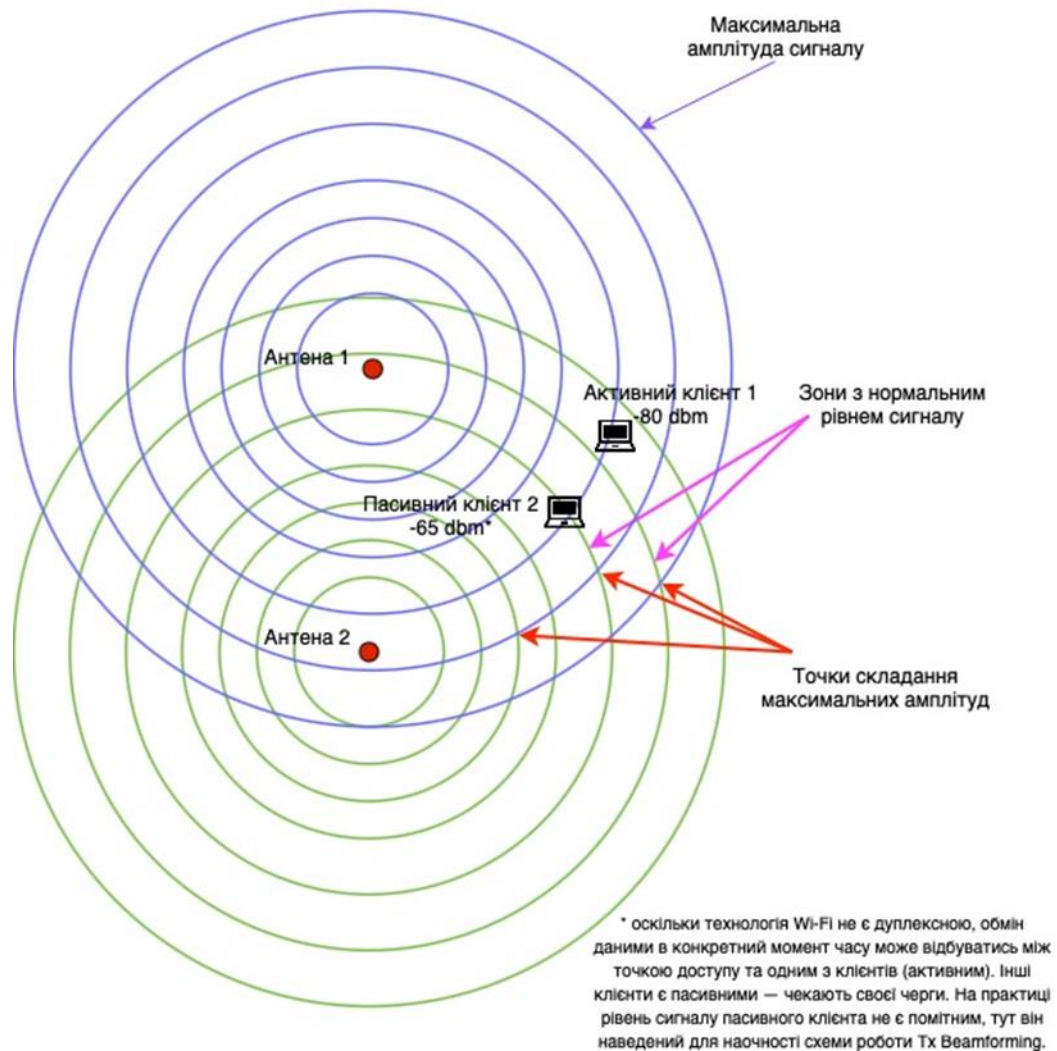
Формування повного символу OFDM

Resource Units



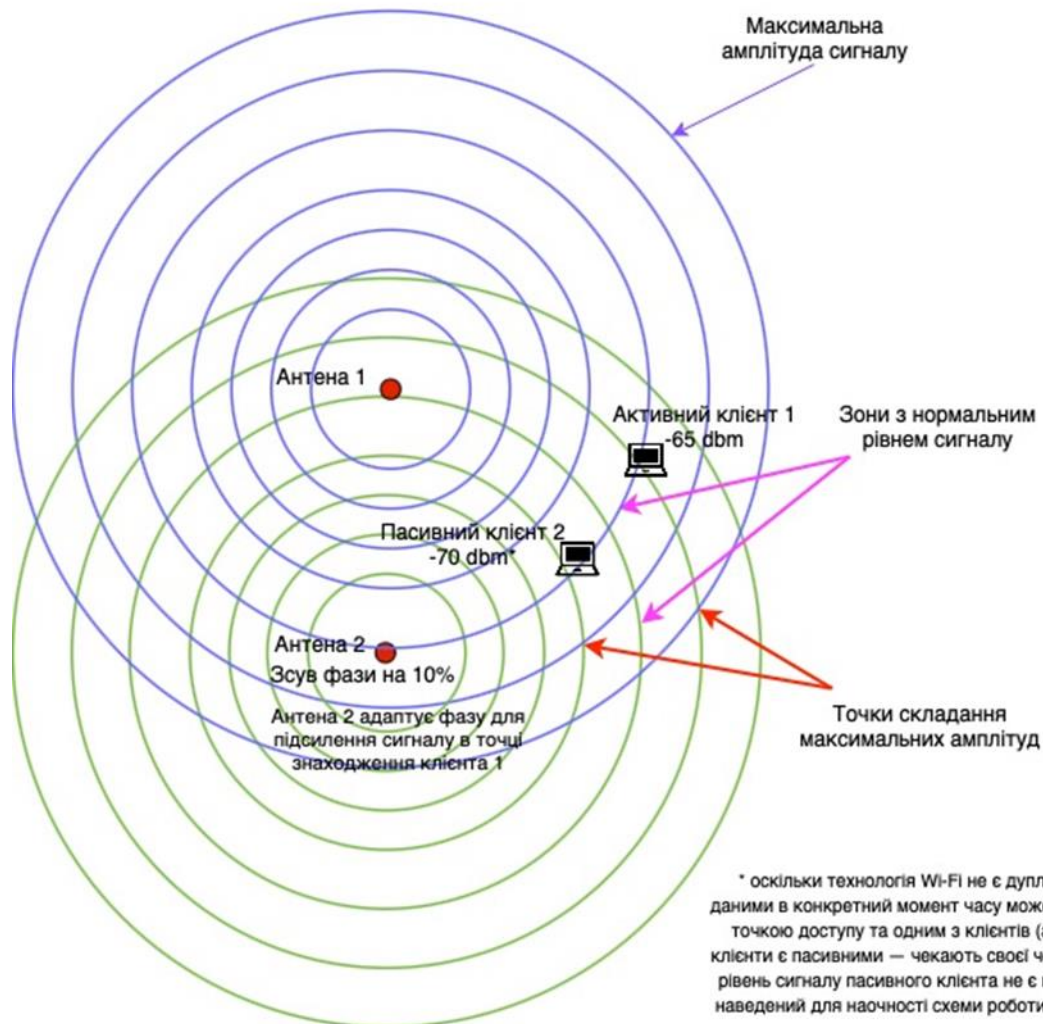
Розподіл каналу 20 МГц на ресурсні блоки

Без Tx Beamforming

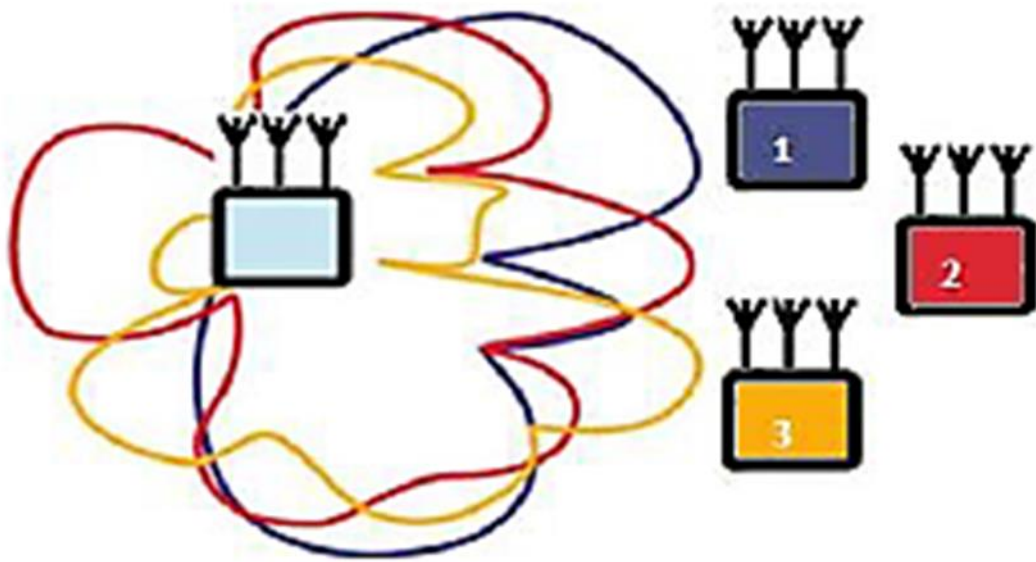


Положення користувачів відносно точки доступу
(активний користувач у зоні деструктивної інтерференції)

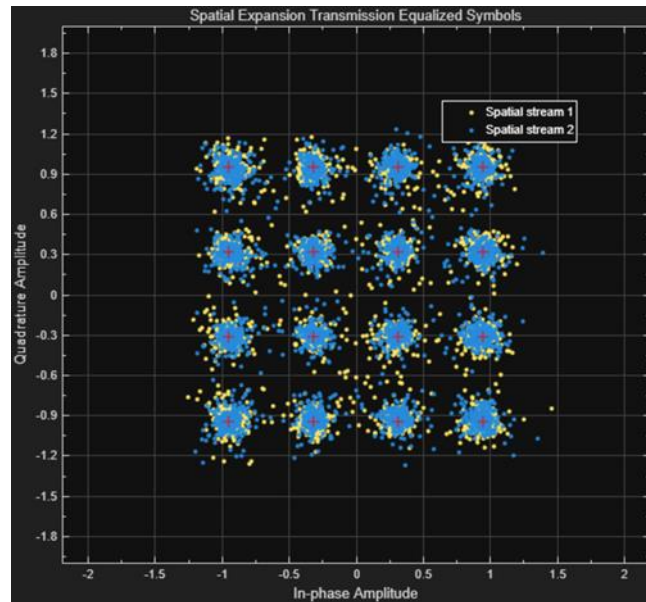
З використанням Tx Beamforming



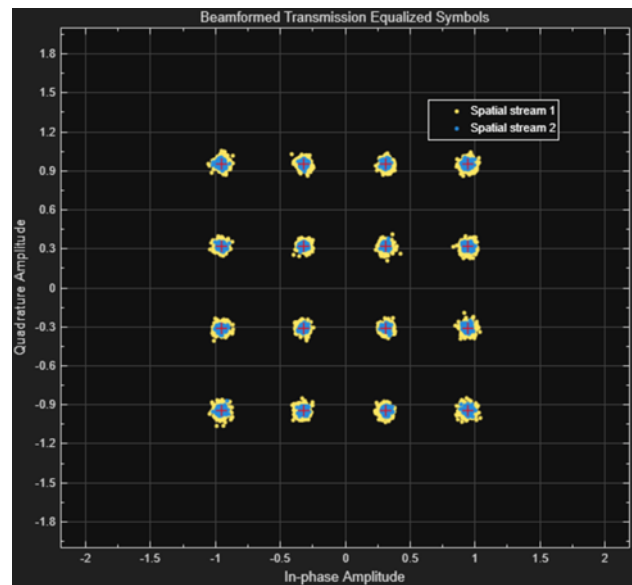
Конструктивна інтерференція у зоні активного клієнта 1



Механізм «нульового керування» в MU-MIMO
(MIMO- Beamforming)



Моделювання при передачі сигналу з просторовим розширенням



Моделювання при передачі сигналу з формуванням променя

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Удосконалення алгоритму beamforming у мережах Wi-Fi для зменшення міжсимвольної інтерференції

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-216
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 12,27 %

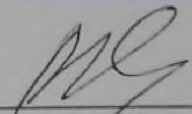
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

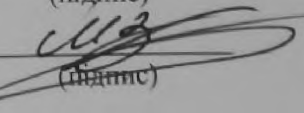
- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

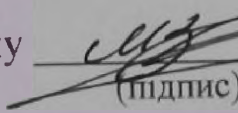
Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП
(прізвище, ініціали, посада)

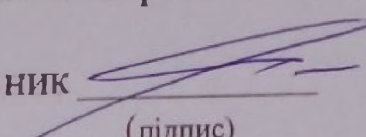

(підпис)


(підпис)

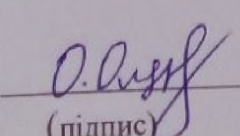
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Барась С.Т., професор кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Олянич О. Ю.
(прізвище, ініціали)