

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____

Інфокомунікацій

(повна назва)

Кафедра _____

Інформаційно-мережної інженерії

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____

другий (магістерський)

*Дослідження методів підвищення продуктивності мереж Wi-Fi
при скоординованому формуванні направленої променя*

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,

групи ІМІМ-24-1

Владислав Сокольников

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 172 «Електронні

комунікації та радіотехніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____

«Інформаційно-мережна інженерія»

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Наталія Харченко

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____

(підпис)

Микола Москалець

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент / Сокольников В. Д. /

Керівник / Харченко Н. А. /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Сокольникову Владиславу Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів підвищення продуктивності мереж Wi-Fi при скоординованому формуванні направленої променя

затверджена наказом університету від 24 жовтня 2025 р. № 959 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 26 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Дослідити методи підвищення продуктивності Wi-Fi мереж у надцільних середовищах шляхом застосування скоординованого формування направленої променя та інтелектуального керування нульовими напрямками. Промоделювати роботу Wi-Fi мереж із використанням алгоритмів навчання з підкріпленням для оптимізації просторових характеристик випромінювання антенних систем. Провести оцінку ефективності підходу за показниками пропускної здатності, SINR, стійкості до інтерференції та масштабованості. Виконати порівняння з класичними методами формування променя та базовими стратегіями відведення нульових зон.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Вступ

1. Основні відомості про побудову бездротових локальних мереж

2. Фактори впливу на продуктивність Wi-Fi мереж у цільних середовищах

3. Оптимізація скоординованого формування променя

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи; перемищення каналів в діапазоні 2,4 та 5 ГГц.; принцип поширення сигналу в умовах міської забудови, моделювання схеми розповсюдження Wi-Fi сигналів в умовах міської забудови, результати імітаційного моделювання, формування променя в надцільних мережах в технології MIMO, структура RL-агента для управління нульовим спрямуванням променя, блок-схема алгоритму керування формуванням направленою променя, оцінка продуктивності розробленого методу, вплив кількості точок доступу, висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	24.10.25	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	25.10-03.11.25	виконано
3	Аналіз особливостей та проблем щільно розгорнутих Wi-Fi мереж	04.11-11.11.25	виконано
4	Аналіз факторів впливу на поширення сигналу в щільно розгорнутих бездротових середовищах	12.11-19.11.25	виконано
5	Дослідження методів формування направленою променя	20.11-27.11.25	виконано
6	Моделювання та оцінка ефективності інтелектуального керування нульовими зонами	30.11-15.12.25	виконано
7	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК	16.12.25	виконано

Дата видачі завдання 24 жовтня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Харченко Н. А.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 79 с., 22 рис., 10 табл., 12 джерел, 2 додатки.

Об'єкт дослідження – бездротові Wi-Fi мережі у щільному міському середовищі.

Мета роботи – дослідження та оцінка методів підвищення продуктивності Wi-Fi мереж шляхом застосування скоординованого формування направленого променя з використанням моделей навчання з підкріпленням.

У роботі проведено аналіз ключових факторів, що впливають на поширення сигналу у щільно розгорнутих бездротових середовищах, включно з явищами відбиття, дифракції та розсіювання, а також змінами метеорологічних умов. Встановлено, що властивості будівельних матеріалів і структура середовища можуть спричиняти втрати сигналу та деструктивну інтерференцію, що знижує стабільність прийому. Досліджено вплив перешкод та інтерференції на характеристики сигналу в різних сценаріях розгортання.

Досліджено та проаналізовано алгоритм нейронної мережі для динамічного формування нульових напрямків null steering у поєднанні з технологією скоординованого формування променя. Встановлено, що алгоритм здатен визначати критично важливі напрями інтерференції, ефективно пригнічувати завади та зберігати просторові ступені свободи для формування основного променя. Проаналізовано вплив конфігурацій кількості точок доступу та користувачів, а також змін параметрів каналу та затримки збору CSI на показники пропускної здатності, SINR та стабільності мережі.

WI-FI, ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ, COORDINATED BEAMFORMING, NULL STEERING, REINFORCEMENT LEARNING

THE ABSTRACT

Explanatory slip 79 p., 22 fig., 10 tab., 12 sources, 2 attach.

Object of research – Wireless Wi-Fi networks in dense urban environments.

The purpose of the work – investigation and evaluation of methods to improve Wi-Fi network performance through the application of coordinated beamforming using reinforcement learning models.

The study analyzes key factors affecting signal propagation in densely deployed wireless environments, including reflection, diffraction, and scattering phenomena, as well as changes in meteorological conditions. It was established that the properties of building materials and the structure of the environment can cause signal losses and destructive interference, reducing reception stability. The influence of obstacles and interference on signal characteristics was investigated in various deployment scenarios.

The neural network algorithm for dynamic null steering in combination with coordinated beamforming technology was examined and analyzed. It was found that the algorithm can identify critical interference directions, effectively suppress disturbances, and preserve spatial degrees of freedom for the formation of the main beam. The impact of different configurations of access points and users, as well as variations in channel parameters and CSI acquisition delay, on throughput, SINR, and network stability was analyzed.

WI-FI, INTERFERENCE, COORDINATED BEAMFORMING, NULL
STEERING, REINFORCEMENT LEARNING

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	10
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОБУДОВУ БЕЗДРОТОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	11
1.1 Поняття частотного каналу	12
1.2 Ширина каналу	14
1.3 Вибір каналів	15
1.3.1 Діапазон 2,4 ГГц.....	15
1.3.2 Діапазон 5 ГГц.....	17
2 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ.....	20
2.1 Проблеми при поширенні радіохвиль	21
2.2 Великомасштабні характеристики каналу	22
2.2.1 Атмосферні та погодні ефекти.....	23
2.2.2 Дифракція.....	25
2.2.3 Відбиття та проникнення	26
2.3 Ефекти каналу малого масштабу	29
2.4 Моделювання поширення сигналу	32
2.4.1 Моделювання в умовах щільної забудови	33
3 Формування променя в надщільних мережах Wi-Fi.....	39
3.1 Модель системи	42
3.2 Алгоритм на основі навчання з підкріпленням.....	50
3.3 Оцінка продуктивності методу	56
3.3.1 Порівняння з сучасними підходами	56
3.3.2 Вплив на формування променя.....	58
3.3.3 Вплив кількості точок доступу	61
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	65
ДОДАТОК А ТЕЗИ ДОПОВІДІ	67
ДОДАТОК Б СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЙ.....	71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- AP (Access Point) – точка доступу;
- Co-BF (Coordinated Beamforming) – скоординоване формування променя;
- CSI (Channel State Information) – інформація про стан каналу;
- DFS (Dynamic Frequency Selection) – динамічний вибір частоти;
- DQN (Deep Q-Network) – алгоритм навчання з підкріпленням, для наближає Q-функцію за допомогою глибокої нейронної мережі;
- DPG (Deterministic Policy Gradient) – детермінований градієнт політики;
- DoF (Degrees of Freedom) – ступені свободи;
- ERP (Effective Radiated Power) – ефективна випромінювана потужність;
- FSPL (Free-Space Path Loss) – втрати сигналу вільного простору;
- HT (High Throughput) – висока пропускна здатність;
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки, організація, що встановлює стандарти;
- ISI (Intersymbol Interference) – міжсимвольні завади;
- LOS (Line of Sight) – прямий огляд, відсутність перешкод між передавачем та приймачем;
- MAPC (Multi-AP Coordination) – координація між кількома точками доступу;
- MIMO (Multiple Input Multiple Output) – множинний вхід і вихід (технологія багатоканальної передачі даних);
- ML (Machine Learning) – машинне навчання;
- NDP (Null Data Packet) – пакет без корисних даних (службовий пакет для вимірювання каналу);
- NLOS (Non-Line of Sight) – неперервний огляд, наявність перешкод між передавачем та приймачем;
- OBSS (Overlapping Basic Service Sets) – перекривні базові сервісні набори;
- PDP (Power Delay Profile) – профіль потужності затримки сигналу;
- PHY (Physical Layer) – фізичний рівень, основний шар моделі OSI, що відповідає за передачу фізичних сигналів;
- RL (Reinforcement Learning) – навчання з підкріпленням;

SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) – відношення сигнал/шум та завад;

SOTA (State of the Art) – найефективніші наявні методи або підходи в конкретній задачі на даний момент, що служать еталоном для порівняння нових рішень.

TPC (Transmit Power Control) – керування потужністю передачі;

TXOP (Transmission Opportunity) – можливість передачі даних у визначений проміжок часу;

ULA (Uniform Linear Array) – однорідна лінійна антенна решітка;

UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) – безліцензійна національна інформаційна інфраструктура, що використовується для бездротової передачі даних у неліцензованих частотних діапазонах;

WLAN (Wireless Local Area Network) – бездротова локальна мережа.

ВСТУП

Постійне зростання числа користувачів та інтелектуальних пристроїв зумовлює підвищені вимоги до пропускної здатності та стабільності бездротових мереж. У надщільних густонаселених міських середовищах традиційні методи та підходи до побудови мережевої інфраструктури Wi-Fi стикаються з істотними обмеженнями, зумовленими виникненням взаємної інтерференції, перенасиченістю радіоканалів та нерівномірним розподілом спектральних ресурсів у спільних або суміжних частотних діапазонах. Це, у свою чергу, призводить до деградації пропускної здатності, підвищення затримок та зниження рівня якості обслуговування, що отримують кінцеві користувачі.

З метою поліпшення ефективності використання спектра в сучасних радіомережах, широко впроваджуються технології формування направлено променя та багатокористувацьких антенних систем MIMO (Multiple Input Multiple Output), що забезпечують реалізацію просторового мультиплексування та гнучкого регулювання траєкторій доставки сигналів. Однак у практичних сценаріях з щільним умовами розгортання подібні методи виявляють обмежену здатність до придушення міжмережових перешкод і не забезпечують оптимального використання доступних просторових можливостей.

У даній роботі досліджується та аналізується метод скоординованого формування направлено променя в Wi-Fi мережах із використанням моделей навчання з підкріпленням для динамічної оптимізації нульових напрямків. Розглядаються особливості взаємодії точок доступу в умовах перешкод із боку OBSS-середовища, оцінюється ефективність застосування нейронних мереж для прийняття рішень щодо просторового керування, покращення пропускної здатності та зменшення рівня інтерференції для побудови високопродуктивних Wi-Fi систем.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОБУДОВУ БЕЗДРОТОВИХ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Стандарт IEEE 802.11, що регламентує правила роботи бездротових локальних мереж, займає провідні позиції як найдоступніший спосіб організації обміну даними. Його широке впровадження зумовлене такими аспектами, як швидкість й оперативність розгортання, усунення необхідності прокладання кабельної інфраструктури та забезпечення мобільності кінцевих користувачів. Завдяки цим перевагам IEEE 802.11 широко застосовується при розгортанні локальних мереж у високощільних міських середовищах, де в попиті наявність гнучких та легко розширюваних мережевих інфраструктур.

У межах сімейства IEEE, підгрупа стандартів 802.11 викладає технічні критерії роботи бездротових локальних мереж. Сюди входять аспекти, що стосуються взаємодії через повітря як середовища передачі, правилами підключення термінальних пристроїв та механізмами доступу до середовища. Подібно до інших розробок IEEE, Wi-Fi встановлює вимоги для фізичного рівня та рівня керування доступом до середовища.

Технологія WLAN (Wireless Local Area Network) набуло значної популярності як спосіб організації бездротової передачі між мережевими пристроями без використання кабельних з'єднань, застосовуючи для цього радіочастотний спектр. Виступаючи як додатковий елемент до традиційних дротових локальних мереж, WLAN забезпечує аналогічний набір мережевих можливостей. Підвищення пропускної здатності таких мереж може бути досягнуто відносно низькою вартістю завдяки розгортанню додаткових точок доступу AP (Access Point). Однак у місцях, де концентрація користувачів дуже висока, спостерігається погіршення робочих характеристик, що викликано наростанням рівня взаємних перешкод на суміжних каналах між сусідніми точками доступу.

У середовищах із високою щільністю розташування інфраструктури сусідні AP нерідко формують області, де їхні зони покриття накладаються. Через вичерпність радіочастотного спектру, це змушує їх функціонувати на тих самих або частково збіжних частотних каналах. Подібні умови конфігурації істотно погіршують експлуатаційні характеристики мережі, оскільки веде до

підвищення рівня взаємних завад. Хоча IEEE 802.11 чітко регламентує робочі частотні діапазони, фактична кількість каналів, які можна задіяти, і потенціал для раціонального їх розмежування в суттєвому ступені зумовлюються регуляторними вимогами та специфіками умов експлуатації.

Один із основних способів зниження втрат продуктивності в перевантажених WLAN полягає у вдосконаленому управлінні радіоресурсами. Цей метод передбачає найбільш оптимальний розподіл каналів між AP, що спрямований на мінімізацію взаємних перешкод і зменшення зон перекриття. У результаті це сприяє підвищенню загальної ефективності роботи бездротової мережі.

1.1 Поняття частотного каналу

Кожна точка доступу функціонує в межах визначеного частотного діапазону, що називається каналом. Для забезпечення обміну даними на фізичному рівні два бездротові пристрої повинні бути налаштовані на один і той самий канал та перебувати в межах досяжності. Стандарти IEEE 802.11, зокрема IEEE 802.11n, передбачають обмежену кількість доступних каналів. Крім того, механізми управління радіочастотними ресурсами обмежують одночасне використання лише кількома неперекривними каналами, що робить цей ресурс досить дефіцитним.

Точки доступу та клієнтські пристрої, що працюють на одному каналі і перебувають у зоні взаємного покриття, формують єдиний широкомовний домен, подібно до функціонування концентратора Ethernet. Усі пристрої здатні виявляти передачі один одного, а одночасні передачі двох пристроїв призводять до колізій і спотворення сигналів, що спричиняє пошкодження або втрату кадрів. У разі частих колізій передача даних стає неефективною через високий рівень повторних спроб [1].

Мовлення на певному каналі перешкоджає будь-які інші випромінювання у межах того ж діапазону частот, який називають областю завад. Спроможність повторного задіяння каналу у просторі залежить від потужності передавального пристрою, адже вона напряму корелює із розміром області створюваних перешкод.

Точка доступу, що працює на конкретному каналі, зазнає впливу перешкод не лише від передач у своєму каналі, а й від сигналів сусідніх каналів. Рівень взаємних перешкод зменшується зі збільшенням частотної відстані між каналами. Наприклад, у діапазоні 2,4 ГГц канали 1, 6 і 11 вважаються «ортогональними», оскільки вони не створюють взаємних перешкод [2].

Одноканальні та суміжньоканальні перешкоди належать до основних джерел деградації якості сигналу в бездротових мережах зв'язку. Одноканальні перешкоди виникають унаслідок небажаних передач у межах одного й того самого частотного каналу, тоді як суміжньоканальні — через активність у каналах, частотні спектри яких частково перекриваються. У часовій області, якщо вузли знаходяться в радіусі перешкод один одного, щоб не здійснювати боротьбу за канал, повинні планувати передачу в різний час, що в свою чергу спричиняє затримки на передачі.

Перешкоди в сусідніх каналах знижують ефективне значення SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio), що, у свою чергу, підвищує ймовірність помилок під час приймання. Одночасні передачі двох бездротових пристроїв призводять до зіткнення сигналів та їх спотворення. Пристрої стандарту 802.11, що працюють на частково перекривних каналах, також можуть здійснювати паралельну передачу, спричиняючи колізії та можливу втрату кадрів [3].

WLAN функціонують у двох неліцензованих радіочастотних діапазонах — 2,4 ГГц і 5 ГГц. Дані смуги частот не призначені виключно для Wi-Fi і використовуються іншими радіотехнологіями, такими як Bluetooth, бездротові телефони, камери спостереження, а також побутові прилади. Стандарти 802.11b та 802.11g оперують лише діапазон 2,4 ГГц, тоді як 802.11n і 802.11ac здатні функціонувати в обох діапазонах. Обмежений радіочастотний ресурс у поєднанні з його спільним використанням сторонніми пристроями істотно підвищує вразливість WLAN до завад.

У високощільних міських населених середовищах одночасна робота корпоративних, публічних та домашніх WLAN призводить до надмірного навантаження на один і той самий частотний спектр. Некероване розгортання інфраструктури викликає високий рівень скупчення AP, що ускладнює підтримку їх стабільного співіснування. Як наслідок, зростає кількість джерел інтерференції, а доступний набір неперекривних каналів скорочується, що спричиняє суттєве зниження ефективності та стабільності роботи мережі.

1.2 Ширина каналу

Стандарт IEEE 802.11 для бездротових локальних мереж використовує смугу частот шириною 22 МГц, причому відстань між центральними частотами сусідніх каналів становить 5 МГц. Енергетичний спектр сигналу охоплює діапазон приблизно 11 МГц навколо центральної частоти.

Ширина каналу визначає, наскільки «широким» буде канал сигналу. Вона залежить від стандарту РНУ (Physical Layer). Стандарт 802.11n НТ (High Throughput) — підтримує канали шириною 20 МГц і 40 МГц, де ширина в 40 МГц – це просто два канали по 20 МГц разом, так званим об'єднаним каналом. Інші стандарти РНУ підтримують ширші канали, VHT (Very High Throughput) і HE (High Efficiency) підтримують ширину каналів 20, 40, 80 і 160 МГц. Важливо розуміти ширину каналів, тому що чим вони ширші, тим більш насиченим буде спектр Wi-Fi [3].

Для забезпечення безперебійного зв'язку та запобігання втраті даних при переміщенні пристроїв між зонами покриття, точки доступу слід розміщувати так, щоб їхні зони покриття частково перекривалися. Важливо, щоб точки доступу, чії зони покриття перетинаються, працювали на різних частотних каналах. Це дозволить уникнути перевантаження мережі та зменшити рівень взаємних перешкод.

На практиці зона покриття AP не має чіткої кругової форми, оскільки на характеристики поширення сигналу впливає безліч факторів. Для визначення реальних параметрів покриття використовуються спеціалізовані програмні та апаратні засоби, які дозволяють аналізувати відстань між точками доступу, форму їх зон впливу та рівень взаємного перекриття. Такі інструменти враховують вплив навколишнього середовища, джерел інтерференції, будівельних матеріалів та інших умов, які визначають фактичні межі комірки. Завдяки їх використанню адміністратори можуть створювати точні моделі мережі, оптимізуючи розміщення точок доступу задля забезпечення більшого покриття і мінімізації частотних перекривань.

1.3 Вибір каналів

У контексті децентралізованих Wi-Fi мереж, критично важливим аспектом є розробка ефективних механізмів для призначення частотних каналів точкам доступу та їхнім клієнтам. Основна мета цього процесу полягає у зменшенні взаємних перешкод, що, у свою чергу, сприяє підвищенню загальної пропускної здатності мережі для кінцевих споживачів.

Майже всі точки доступу сьогодні мають функцію автоматичного каналу, яка повинна вибирати найкращий канал під час завантаження точки доступу, а деякі додатково мають функцію динамічного каналу, яка постійно сканує простір заповнений радіохвилями (безперервно або через встановлені інтервали) і перемикається на канал із найкращим доступним наразі сигналом. Але рівень вимірювання та точність відрізняються для різних точок доступу, тому слід завжди вручну перевіряти призначення автоматичних каналів відразу після розгортання та періодично після цього. Щоб правильно проаналізувати канали, важливо розуміти смуги частот відповідні їм канали [4].

1.3.1 Діапазон 2,4 ГГц

Стандарт IEEE 802.11 визначає чотирнадцять каналів у діапазоні 2,4 ГГц, кожен із шириною смуги 20 МГц, для обладнання, що відповідає специфікаціям 802.11b/g/n/ax. Водночас фактична доступність і використання цих каналів регулюється національними нормами радіочастотного менеджменту. Хоча теоретично в діапазоні доступні чотирнадцять каналів, з практичних причин у більшості сценаріїв доцільним є застосування лише трьох неперекривних каналів, що зумовлено частотним перекриттям та регуляторними обмеженнями (рис. 2.1). Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 1340, яка визначає порядок розподілу та використання радіочастотного ресурсу, для мереж Wi-Fi дозволено застосовувати канали з 1 по 13.

Кожен бездротовий пристрій отримує номер каналу, який встановлює центральну частоту для його сигналу. Однак, у діапазоні 2,4 ГГц сигнал не обмежується лише однією частотою, а займає діапазон, що охоплює кілька сусідніх каналів. Наприклад, пристрій, що працює на 1-му каналі, фактично використовує частоти, що відповідають каналам від -2 до 3. При роботі на 8-му каналі задіяні частоти каналів з 6 по 10, а при виборі 11-го – з 9 по 13. Це

означає, що один логічний канал шириною 20 МГц фактично займає простір, еквівалентний чотирьом каналам з кроком 5 МГц. Розуміння цього явища є ключовим для ефективного створення та налаштування мереж Wi-Fi.

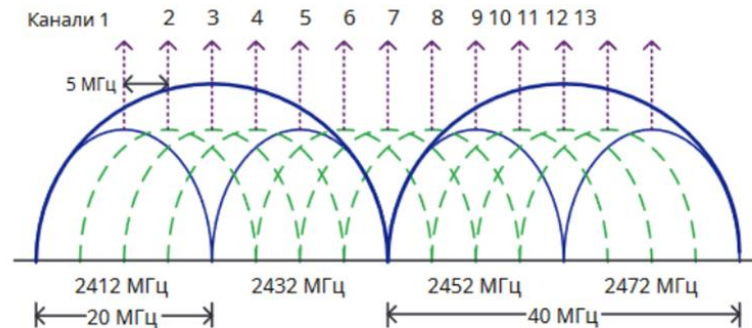


Рисунок 1.1 – Канали для діапазону 2,4 ГГц

Ідеальний варіант для використання при настроюванні пристроїв - це трійка каналів 1, 6 та 11. Також задовільні варіанти 2, 7, 12, та 3, 8, 13. Трохи щільніше, але прийнятний розподіл 1, 5, 9, 13 для каналів завширшки у 40 МГц. Також можливий гірший варіант по два канали 2 та 7, 3 та 8, 4 та 9, або 5 та 10. Використання лише каналів 1, 6 дає вам найбільш корисну пропускну здатність. Канал 14 надасть вам ще один неперекриваючий канал, але цей канал підтримується лише в Японії. Стандарт бездротового зв'язку 802.11n, представлений у 2009 році, додав необов'язкове об'єднання каналів, яке об'єднує два суміжні канали 20 МГц для створення єдиного каналу шириною 40 МГц, щоб збільшити швидкість з'єднання та пропускну здатність. Однак у діапазоні 2,4 ГГц достатньо місця лише для одного неперекриваючого каналу 40 МГц, а решта простору пропонує достатньо місця лише для одного звичайного неперекриваючого каналу 20 МГц. Ці обмеження доцільні для небагатьох мереж і умов, тому зазвичай краще дотримуватися застарілої ширини каналу [4].

Незважаючи на використання триканальної схеми повторного застосування, повністю усунути міжканальні завади в діапазоні 2,4 ГГц неможливо. Це обумовлено фізичною природою радіосигналів, для яких часткове перекриття спектрів є неминучим явищем. Перехід до діапазону 5 ГГц значно покращує ситуацію завдяки наявності більшої кількості доступних каналів. Водночас і цей діапазон має власні специфічні експлуатаційні особливості.

1.3.2 Діапазон 5 ГГц

У діапазоні 5 ГГц кількість доступних каналів Wi-Fi перевищує таку в 2,4 ГГц, проте їх використання обмежене регіональними нормативами, доступністю спектру та максимальними рівнями потужності передавачів. Через менший радіус дії та знижену здатність сигналу проникати крізь перешкоди кількість конкуруючих пристроїв у мережах 5 ГГц є меншою, що полегшує управління каналами. Для роботи в цьому діапазоні домашні маршрутизатори зазвичай використовують канали шириною 40 або 80 МГц, що фактично залишає їх користувачам лише два неперекривні канали (рис. 2.2). А саме нижній канал, що включає канали з 36 по 64 шириною в 5 МГц, і верхній канал, що включає канали з 149 по 165.

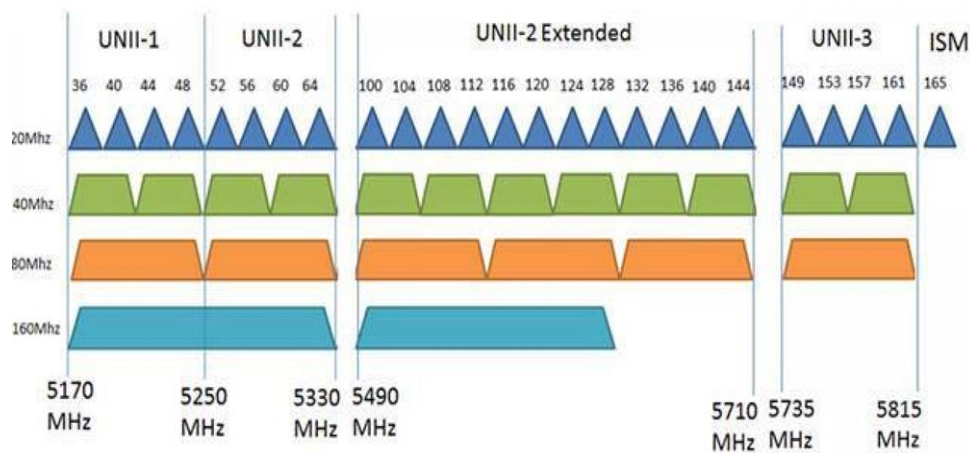


Рисунок 1.2 – Канали для діапазону 5 ГГц

У діапазоні 5 ГГц, мережі з шириною каналу 40 МГц фактично використовують приблизно вісім 5 МГц каналів. Це призводить до того, що сигнал 40 МГц охоплює кілька сусідніх каналів, займаючи ширший спектр порівняно з пристроями 2,4 ГГц.

Смуга частот 5 ГГц забезпечує більший частотний діапазон, пропонуючи до 25 можливих доступних каналів, а саме від 36 до 165. Незважаючи на це, не всі канали можна використовувати. Пристрої Wi-Fi налаштовані на роботу на каналах, що не перекриваються (наприклад, 45, 49, 53 і т.д.), а не на тих, що йдуть підряд (наприклад, 49, 50, 51 і т.д.), коли старі канали 20 МГц не використовуються. Кожен доступний канал знаходиться на відстані чотирьох

каналів один від одного, але існують переривання, як між каналами 64 і 100 через неперервну природу частотного простору, виділеного для Wi-Fi [4].

Хоча теоретично діапазон 5 ГГц може підтримувати чотири мережі по 40 МГц або дві мережі по 80 МГц, на практиці домашні пристрої часто використовують ширші канали, об'єднуючи їх. Наприклад, 80 МГц може бути налаштовано на каналі 36 або 44. Це відбувається тому, що досягти максимальної продуктивності з широкими каналами в звичайних умовах складно. Тому, хоча створення багатьох швидких мереж у 5 ГГц можливе на папері, для їх реального запуску потрібні продумані плани розподілу каналів.

Бездротові мережі Wi-Fi, що працюють у діапазоні 5 ГГц, повинні мати можливість виявлення та запобігання зіткненням з радарми та спеціальним обладнанням, захищаючи від перешкод, шляхом динамічного перемикання робочої частоти DFS (Dynamic Frequency Selection) та управління потужністю передачі TPC (Transmit Power Control) на кожному каналі [5].

Канали розташовані з кроком 20 МГц та поділені на три смуги неліцензованої національної інформаційної інфраструктури UNII (Unlicensed National Information Infrastructure). У межах цих смуг можуть функціонувати бездротові пристрої, сумісні зі стандартами 802.11a/n/ac/ax. В Україні, як і в інших регіонах, структура цих діапазонів спрямована на ефективне використання спектру та зниження рівня взаємних перешкод.

Смуги UNII в Україні:

- UNII-1 (5,150-5,250 ГГц) включає канали 36, 40, 44 і 48;
- UNII-2 (5,250-5,350 ГГц та 5,470-5,725 ГГц) містить канали 52, 56, 60, 64, 100, 104, 108, 112, 116, 120, 124, 128, 132, 136 і 140. Для забезпечення коректної роботи необхідна підтримка DFS, оскільки зазначені канали спільно експлуатуються з радіолокаційними системами;
- UNII-3 (5,725-5,825 ГГц) канали 149, 153, 157 і 161.

Діапазон 5 ГГц, що відзначається значною кількістю незалежних каналів, забезпечує оптимальні умови для побудови мереж з високою концентрацією абонентів. З огляду на це, рекомендується заохочувати підключення пристроїв до цього діапазону, особливо в умовах обмеженої відстані, де його ефективність проявляється найповніше. Для використання в діапазоні 5 ГГц пропонуються наступні канали:

- будь-який доступний канал для ширини в 20 МГц;

- без використання DFS на ширині 20 МГц – 36, 40, 44, 48, 149, 153, 157, 161 . З використанням динамічного перемикавання частот – 52, 56, 60, 64;
- для ширини 80 МГц: без DFS – 40, 44, 48, 149, 157, з DFS 52, 56;
- на ширині 160 МГц: без DFS – 40, 44, 48, з DFS – 52, 56.

Регуляторні обмеження, що обмежують використання окремих сегментів частотного спектру, можуть призводити до того, що AP не підтримують усі теоретично доступні канали. Вимоги до використання частотного спектру можуть суттєво варіюватися залежно від регіону, що обумовлено потребою ефективного управління ресурсами та уникнення взаємних перешкод. Водночас не всі точки доступу оснащені технологіями, здатними повною мірою відповідати цим обмеженням. З метою оптимізації витрат або орієнтації на специфічні сегменти ринку виробники нерідко свідомо утримуються від впровадження таких функцій. Як наслідок, окремі точки доступу можуть мати обмеження у роботі з певними каналами чи частотними діапазонами, регламентованими нормами законодавства.

Канали з 52 по 144 накладають найбільш суттєві обмеження на конфігурацію бездротові мережі. AP що використовують ці канали, зобов'язані підтримувати DFS та TPC, щоб запобігти перешкодам від радіолокаційних систем, які мають пріоритет у цьому діапазоні частот. Якщо точками доступу не передбачена їх підтримка або радіолокаційна активність перешкоджає їх використанню, кількість доступних мережевих каналів значно зменшується. При традиційній ширині каналу 20 МГц буде доступно до дев'яти каналів, що не перекриваються. Ширина 40 МГц дає чотири канали, ширина 80 МГц – лише два. Таким чином, для точок доступу, які не підтримують усі канали, вам, швидше за все, доведеться дотримуватися каналів не більше 40 МГц [4].

Неможливість використання певних каналів зв'язку або частотних діапазонів свідчить про критичну важливість дотримання нормативних актів при підборі мережевого обладнання та встановленні точок доступу. Відповідальність мережевих адміністраторів полягає у забезпеченні повної відповідності вибраних пристроїв чинному законодавству та місцевим стандартам, що дозволить уникнути юридичних наслідків та забезпечити надійне та продуктивне функціонування бездротової локальної мережі.

2 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ

Впровадження та розвиток технологій міліметрових хвиль (mmWave) є одним із потенційних етапів подальшого розвитку бездротових систем зв'язку. Цей напрямок розвитку спрямований на досягнення значного збільшення пропускної здатності, прискорення передачі даних та оптимізацію використання радіочастотного спектра, що є критично важливим для задоволення зростаючого попиту на високошвидкісний доступ та подолання обмежень, пов'язаних з перевантаженістю нижчих частотних діапазонів. Область частот від 3 до 300 ГГц розглядається як перспективне середовище для побудови сучасних систем зв'язку, зокрема мереж 5G та високошвидкісних бездротових локальних. Більше того, він має великий потенціал в наданні високошвидкісного широкосмугового доступу до мережі. Тому є підстави вважати, що спектр міліметрових хвиль стане наступною ланкою еволюції бездротових технологій, що традиційно передбачає підвищення швидкості передавання даних, зростанням надійності з'єднання та покращенням якості користувацького досвіду.

З огляду на зростаючий попит на широкосмугові послуги зв'язку, сучасні бездротові системи стикаються з необхідністю значного підвищення пропускної здатності. У цьому контексті й розглядається міліметровий діапазону, який здатний забезпечити значно вищі швидкості передачі даних у високонавантажених середовищах. Водночас їх застосування потребує врахування специфіки поширення сигналів у міліметровому діапазоні, зокрема обмеженої дальності та підвищеної чутливості до затухання сигналу.

Поширення електромагнітних хвиль у міліметровому діапазоні супроводжується значними втратами потужності через атмосферне поглинання, розсіювання та інші ослаблюючі ефекти. Коротка довжина хвилі підвищує чутливість сигналу до перешкод, що призводить до утворення зон втрати зв'язку та значного зниження ефективності передачі в умовах непрямой видимості NLOS (Non-Line of Sight). Це обмежує радіус дії мережі та вимагає застосування технологій, здатних підтримувати стабільність каналу за відсутності прямої видимості LOS (Line of Sight).

Для компенсації втрат і підвищення енергетичної ефективності систем використовуються високодирективні антени, здатні концентрувати випромінювання в обраному напрямку, та методи скоординованого формування променя. Адаптивний підхід може мінімізувати вплив затухання, забезпечити просторову концентрацію енергії та підвищити стійкість зв'язку в умовах складного радіосередовища. Ефективне впровадження mmWave-технологій також потребує нормативного врегулювання спектрального використання, спрямованого на оптимальний розподіл частотних ресурсів і мінімізацію взаємних перешкод між системами [6].

2.1 Проблеми при поширенні радіохвиль

Для коректної оцінки параметрів сигналу в процесі його розповсюдження, критично важливим є глибоке розуміння та врахування специфіки його поширення. Це включає аналіз очікуваних масштабів бездротової передачі, інтенсивності та природи перешкод, обмежень потужності передавача, конструктивних особливостей приймача та характеристик антен. Особливу увагу слід приділити тому, що фізичні об'єкти при міліметрових частотах є більшими відносно довжини хвилі, що зумовлює додаткове блокування сигналу.

При моделюванні характеристик під час поширення каналу враховуються затухання зумовлені відбиттям, дифракцією, заломленням, розсіюванням хвиль і проникненням сигналу крізь матеріальні об'єкти. У випадках, коли прямий канал зв'язку заблокований, передача може здійснюватися за рахунок багатопроменевого розповсюдження, що забезпечує роботу мереж навіть за умов непрямої видимості. Для зменшення втрат потужності та підвищення надійності каналу застосовуються сучасні технології просторової обробки сигналів, зокрема формування променя за допомогою фазованих антенних решіток з високим коефіцієнтом підсилення, багатокористувацькі системи MIMO, а також адаптивні методи кодування та модуляції. Ці підходи забезпечують оптимізацію характеристик системи, підвищують ефективність використання спектра та стійкість до впливу перешкод і багатопроменевості.

У міліметровому діапазоні, зокрема на частоті 60 ГГц, молекули кисню спричиняють атмосферне ослаблення сигналу приблизно 15 дБ/км, однак цей ефект є суттєвим лише для зв'язку на великих відстанях поза приміщеннями. У

внутрішніх середовищах вплив поглинання O_2 є незначним, що робить діапазон 60 ГГц перспективним для багатогігабітних систем бездротового зв'язку за стандартом IEEE 802.11ad. Такі локальні WLAN мережі можуть ефективно доповнювати стільникові системи, забезпечуючи розвантаження мобільного трафіку шляхом його перенаправлення до точок доступу Wi-Fi. Використання цього діапазону в межах концепції 5G сприяє підвищенню ефективності розподілу навантаження та зменшенню кількості антенних елементів завдяки короткій довжині хвилі. Водночас молекулярний склад повітря та водяної пари істотно впливає на затухання у субтерагерцовому діапазоні, що обмежує дальність зв'язку. З огляду на це, частоти 60, 180 та 380 ГГц є доцільними для неліцензованих систем короткого радіусу дії, тоді як діапазони 0–50 ГГц і 200–280 ГГц придатніші для мобільних і стільникових мереж завдяки нижчому рівню атмосферних втрат [7].

Розповсюдження радіохвиль у міліметровому діапазоні значно ускладнюється через змінність фізичних характеристик перешкод, що виникають на їхньому шляху. Відбиття, розсіювання, блокування та втрати, пов'язані з проникненням через матеріали, суттєво впливають на якість отриманого сигналу та стабільність зв'язку. Когерентні перешкоди між передавачами, які працюють на однакових частотах, а також поглинання сигналу атмосферними і погодними факторами безпосередньо обмежують дальність та якість покриття. Застосування спрямованих антен дозволяє природним чином знижувати рівень завад і компенсувати втрати потужності, викликані атмосферними умовами. Сучасні mmWave-системи оснащені функціями програмного налаштування підсилення, ширини та напрямку променя, що забезпечує адаптивну підтримку стабільного зв'язку навіть у складних і неоднорідних умовах.

2.2 Великомасштабні характеристики каналу

Розповсюдження електромагнітних хвиль у вільному просторі слугує базовим підґрунтям для оцінки макроскопічних впливів каналу зв'язку, оскільки дозволяє побачити залежність втрат потужності сигналу від відстані між передавачем і приймачем. Для цього застосовується рівняння втрат шляху у вільному просторі, запропоноване Гарольдом Т. Фрісом, яке є математичною

моделлю процесу поширення хвиль за відсутності перешкод, відбиттів та розсіювання:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L} \frac{\lambda}{(4\pi d)^2}, \quad (2.1)$$

де G_t – коефіцієнти підсилення антен передавача;

G_r – коефіцієнти підсилення антен приймача;

λ – довжина хвилі, м;

d – просторове віддалення між приймачем і передавачем, м;

L – коефіцієнт системних втрат.

Це рівняння є основою для оцінки енергетичної ефективності передавача в LOS сценаріях. Втрати шляху зростають зі збільшенням частоти та відстані, що впливає з рівняння для поширення прямої хвилі у вільному просторі. На високих частотах втрати є значними навіть на коротких дистанціях.

2.2.1 Атмосферні та погодні ефекти

Поширення електромагнітних хвиль на міліметрових частотах супроводжується значним атмосферним ослабленням. Порівняно з нижчими частотами, ці зазнають суттєво більших втрат під час поширення. Коли радіохвилі проходять крізь тропосферу, вони взаємодіють із газовими молекулами атмосфери, такими як кисень O_2 , азот N_2 та водяна пара H_2O . Коли електромагнітне випромінювання досягає квантових енергетичних рівнів молекул, воно частково поглинається. Внаслідок цієї взаємодії відбувається поглинання енергії та, відповідно, ослаблення сигналу. Великі втрати виникають під час резонансу молекул, коли їхні електрони делокалізуються. Асиметрична молекула води H_2O , зазнаючи дії сильного електричного поля, орієнтується у напрямку мінімального потенціалу, при цьому відбувається втрата енергії. Через це хвилі міліметрового діапазону можуть сильно поглинатися або блокуватися перешкодами, що створює «мертві зони» сигналу та обмежує можливості LOS сценаріїв [6, 7].

Залежність ступеня атмосферного затухання від концентрації водяної пари демонструє графік на рисунку 2.1.

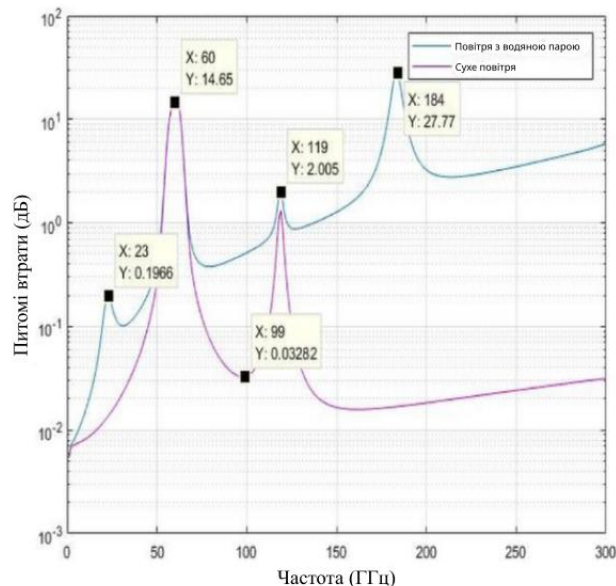


Рисунок 2.1 – Залежність ступеня атмосферного затухання від частоти при різній концентрації водяної пари

Спостерігається найбільше затухання електромагнітних хвиль в діапазонах 120 та 60 ГГц. Цей факт обмежує радіус дії мережі в сценаріях LOS. Водночас це можна використовувати в умовах щільного розгортання малих комірок, де це буде сприяти повторному використанню частотного ресурсу та спектральної ефективності. Питомі втрати пропорційні збільшенню вмісту водяної пари. У діапазонах 28 ГГц та 38 ГГц рівень поглинання незначний, що робить їх перспективними в інфраструктурі бездротових мереж забезпечуючи обсяг доступного неліцензованого спектра.

Також затухання міліметрових хвиль значною мірою залежить від інших погодних факторів, оскільки розміри таких опадів, як сніжинки, градини і краплі дощу, є співрозмірними з довжиною хвилі використовуваного діапазону. Інтенсивність, відстань, розмір та форма крапель безпосередньо впливають на ступінь поглинання сигналу.

На частоті 28 ГГц затухання складає приблизно 7 дБ/км, що робить сигнал чутливим до інтенсивного дощу понад 25 мм/год, тоді як на частотах вище 90 ГГц рівень затухання вирівнюється й залишається майже сталим. Компенсація втрат, спричинених опадами, можлива за рахунок використання антен із високим коефіцієнтом підсилення, здатних динамічно змінювати характеристики залежно від миттєвої інтенсивності дощу, або шляхом регулювання потужності передавання [6].

2.2.2 Дифракція

Навіть за відсутності прямої видимості між передавачем і приймачем радіосигнал може досягати пункту призначення завдяки дифракції. Ступінь дифракції визначається співвідношенням розмірів перешкоди та довжини хвилі, а також формою краю об'єкта. Водночас чіткі та більш різкі краї спричиняють інтенсивніший ефект, ніж округлі. На рисунку 2.2 зображено процес дифракції радіосигналу, де початкова траєкторія випромінювання натикається на перешкоду у вигляді будівлі, що спричиняє огинання сигналу по краю об'єкта, формуючи дифракційну траєкторію. Позаду перешкоди утворюється зона радіочастотної тіні, в якій спостерігається ослаблення потужності сигналу. В однорідному середовищі низькочастотні хвилі огинають перешкоди ефективніше, демонструючи більшу здатність до дифракції порівняно з високочастотними сигналами.

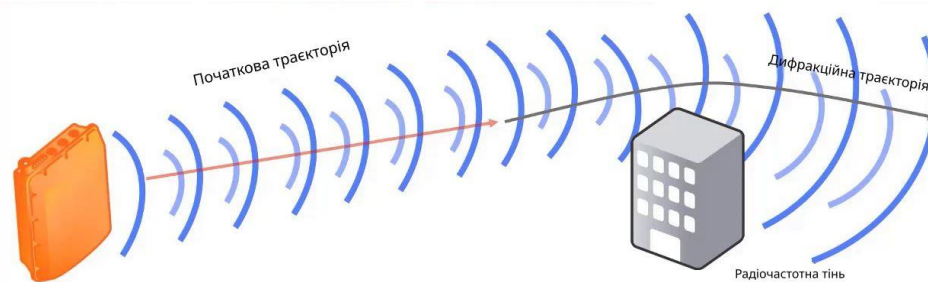


Рисунок 2.2 – Дифракція радіосигналу на перешкоді

Дифракція виникає при огинанні хвиль перешкодами, змінюючи амплітуду та фазу сигналу в зоні тіні, що зменшує його силу. Оскільки поле все ще зберігає достатню інтенсивність, сигнал продовжує існувати. Для типових перешкод, розміри яких значно перевищують довжину хвилі, ефект дифракції незначний через формування різких тіньових зон. У міліметровому діапазоні канал поширення має квазіоптичну природу, тому хвилі переважно рухаються прямолінійно, а поширення через дифракцію практично відсутнє. Основна потужність сигналу передається по LOS та відбитих шляхах нижчого порядку [7].

Для мінімізації втрат, спричинених дифракцією, можуть застосовуватись високо спрямовані антени з можливістю електронного сканування променя,

тобто швидкої зміни напрямку випромінювання за рахунок регулювання фазових зсувів у масиві антен без механічного повороту. Подібні системи здатні фіксувати розсіяні та відбиті сигнали від оточуючих поверхонь, а також коригувати напрямок променя, компенсуючи недостатню потужність основного сигналу, що йде за LOS.

У середині приміщень дифраговані сигнали в міліметровому спектрі зазнають значного ослаблення. Що робить цей шлях слабким та непередбачуваним. Унаслідок цього на передній план виходить розповсюдження енергії через відбиття та розсіювання.

2.2.3 Відбиття та проникнення

Коли електромагнітна хвиля під час поширення стикається з предметом, чий габарити є значно більшими за її власну довжину, спостерігається явище відбиття. Частину з тієї енергії, яку несе хвиля, відбивається від поверхні, тоді як залишок проходить крізь матеріал. Це відбувається через відмінності у здатності середовищ до діелектричного проникнення та їхньої провідності. На рисунку 2.3 показано модель поширення радіохвилі, яка під час взаємодії з об'єктом частково відбивається або проникає всередину залежно від характеристик матеріалу, з якого складається перешкода.

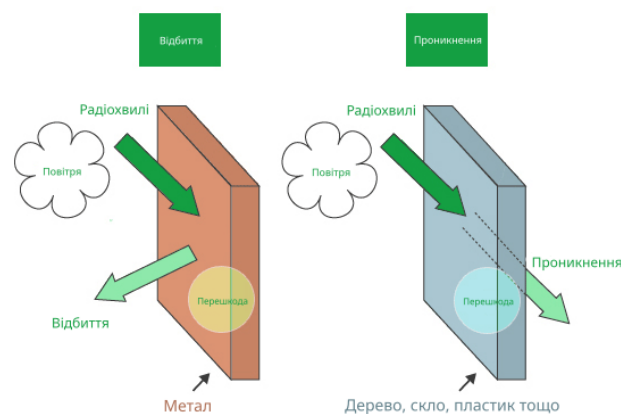


Рисунок 2.3 –Процес відбиття та проникнення радіохвиль

Розподіл енергії між відбитою та заломленою хвилями визначається матеріальними властивостями об'єкта, а також характеристиками хвилі, такими як частота, поляризація та кут падіння. Якщо матеріал є ідеальним провідником, поляризація сигналу визначає, яка частка енергії буде відбита. На високих

частотах поверхня виглядає шорсткішою, тому спостерігається переважно дифузне відбиття, тоді як дзеркальне відбиття від гладкої поверхні стає менш вираженим. Отже, більша частина сигналу розсіюється, і кількість відбитої потужності, що досягає приймача, зменшується [6].

Обробка найсильніших прямих, відбитих і розсіяних багатопроменевих компонентів сигналу з метою забезпечення стабільного зв'язку за різних умов експлуатації є одним із ключових викликів для систем, в основі яких лежить використання міліметрового діапазону частот.

На міліметровий діапазон значний вплив має явище розсіювання, оскільки предмети перевищують за розміром довжину хвилі сигналу. Розсіювачі формують додаткові шляхи поширення, потужність яких може бути співмірною або навіть більшою за відбиті сигнали внаслідок домінантності в габаритах об'єктів у середовищі поширення.

Основними параметрами, що впливають на розсіювання в умовах відкритого середовища, є радарна ефективна площа об'єкта та шорсткість його поверхні. Ефективна площа розсіювання відображає еквівалентну апертуру об'єкта, через яку випромінюється або відбивається електромагнітна енергія [6].

У відкритих середовищах гладкі металеві поверхні, наприклад дахові покриття з алюмінію або металеві рекламні щити, виступають потужними джерелами багатопроменевого поширення, значно ефективнішими, ніж на нижчих радіочастотах. Шорсткі поверхні, такі як бетонні стіни або коріння дерев, демонструють меншу ефективність як джерела вторинного випромінювання. Водночас великі площі шорстких об'єктів, наприклад фасади житлових комплексів або ряди кущів і дерев уздовж вулиць, здатні формувати значну розсіяну енергію в міліметровому діапазоні завдяки співвідношенню розмірів поверхні до довжини хвилі. На рисунку 2.4 подано ілюстрацію процесу розсіювання, що виникає під час поширення сигналу між передавальним і приймальним пристроями у неоднорідному середовищі. Зображення демонструє формування додаткових розсіяних компонентів траси внаслідок взаємодії хвилі з об'єктами на шляху її поширення.

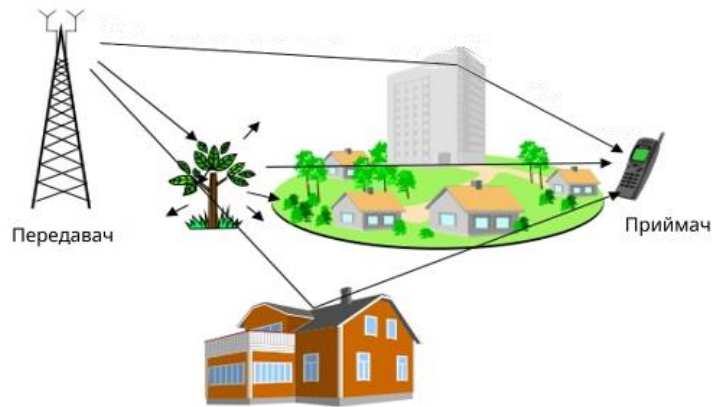


Рисунок 2.4 – Процес розсіяння радіохвиль

Рослинність в зоні поширення сигналу може підтримувати NLOS-шляхи з потужністю, що стабільно перевищує потужність прямих LOS-шляхів. На нижчих частотах середнє затування при проходженні крізь листяний покрив може ще й посилитись. Тому в міліметровому діапазоні можна спостерігати суттєвіше затування при проходженні крізь кущову масивність або деревину між передавачем і приймачем порівняно з сигналами нижчих частот.

Вплив рослинності на міліметрові хвилі в зоні поширення сильніший, ніж на низьких частотах, через менші розміри зон Френеля, так як й довжина самої хвилі коротша. Як показано на рисунку 2.5, зони Френеля — це концентричні області навколо перешкоди між передавачем і приймачем, де довжина шляху сигналу відрізняється на цілу або половинну кількість хвиль від прямого шляху.

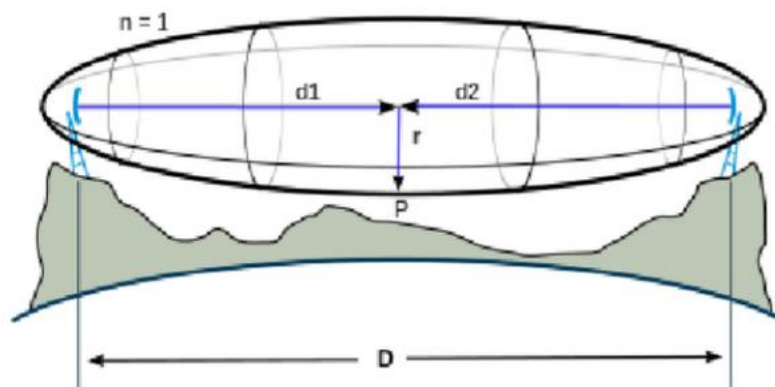


Рисунок 2.5 – Зона Френеля

Радіус n -ї зони Френеля визначається наступним співвідношенням:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{D}}, \quad (2.2)$$

де r_n – радіус n -ї зони, м;

n – номер зони;

d_1 – відстань від передавача до досліджуваної точки Р, м;

d_2 – відстань від точки Р до приймача, м.

Якщо першу зону Френеля не перекрито, втрати сигналу через дифракцію між передавачем і приймачем мінімальні. При блокуванні цієї зони спостерігається значне затухання, а перекриття наступних зон лише посилює втрати. Для міліметрових хвиль приймають, що перекриття першої зони спричиняє втрату зв'язку, тому оцінюють насамперед наявність вільного проходження тільки через її простір.

2.3 Ефекти каналу малого масштабу

З ефектом багатопроменевості амплітуда сигналу знижується через деструктивну інтерференцію, та виникає різниця в часі надходження компонентів, що проходять різними шляхами від передавача до приймача. Різниця між моментом прибуття першого й найпізнішого компонентів визначає затримку поширення сигналу. Різниця між моментом прибуття першого та найпізнішого з компонентів визначає затримку при поширенні. Максимальна надлишкова затримка визначається за наступним співвідношенням:

$$T_{max} = \tau(l) - \tau(0), \quad (2.3)$$

де $\tau(l)$ – час надходження l -го відбитого або розсіяного променя, с;

$\tau(0)$ – час прибуття прямого сигналу.

Середньоквадратична затримка поширення сигналу є статистичною характеристикою, що враховує варіації цієї затримки в часі, тоді як звичайна затримка дає її безпосередню часову оцінку. Оскільки середньоквадратичне значення відображає ступінь дисперсії каналу, його часто використовують при

розробці реальних систем зв'язку. Для його розрахунку використовується формула 2.4 [6].

$$\tau_{rms} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{l=0}^L (\tau[l] - \tau[0])^2 E|h_e[l]|^2}{\sum_{l=0}^L E|h_e[l]|^2} \right) - \left(\frac{\sum_{l=0}^L (\tau[l] - \tau[0]) E|h_e[l]|^2}{\sum_{l=0}^L E|h_e[l]|^2} \right)^2}, \quad (2.4)$$

де $E|h_e[l]|^2$ – профіль затримки потужності, Вт;

L – кількість значущих багатопроменевих компонент.

Профіль затримки потужності PDP (Power Delay Profile) відображає середню імпульсну характеристику каналу в межах локальної області. Середньоквадратичне розсіяння затримки інтуїтивно характеризує часову дисперсію сигналу, зумовлену ефектом багатопроменевого поширення.

Ще одним проявом ефектів каналу малого масштабу є міжсимвольна інтерференція ISI (Intersymbol Interference), що виникає внаслідок різних часових затримок багатопроменевих компонентів сигналу. Відбиті копії символів можуть надходити у різний час та накладатися на наступні, спричиняючи їх часткове перекриття й спотворення часової структури сигналу. Даний фактор спричиняє деградацію точності прийому інформації та підвищує ризик виникнення помилок. Для зниження впливу ефектів ISI, при заданому значенні τ_{rms} , кількість символів, що перекриваються, має бути компенсована вибором тривалості символу T_s , або відповідною швидкістю передачі $1/T_s$, що можна оцінити через відношення:

$$\left\lceil \frac{\tau_{rms}}{T_s} \right\rceil - 1. \quad (2.5)$$

Отже, чим більше значення кількості символів, які потенційно перекриваються через багатопроменеву затримку, тим сильніше проявляється міжсимвольна інтерференція, що вимагає збільшення тривалості символу або зменшення швидкості передачі для забезпечення коректного й надійного приймання сигналу.

У сільських районах кількість суттєвих мультишляхових компонент зазвичай обмежена, оскільки більшість відбитих сигналів мають рівень, що не перевищує 20 дБ відносно домінантного променя. У міському середовищі,

навпаки, велика кількість відбиттів від будівель формує значну множину високорівневих шляхів, навіть за відсутності прямої лінії зв'язку. За наявності прямої видимості сигнал LOS характеризується максимальною потужністю та мінімальною затримкою, оскільки відбиття й розсіювання на NLOS-шляхах призводять до додаткових втрат. Дифракційні та механізми розсіювання надалі зменшують амплітуду відповідних компонент. У разі наявності кількох NLOS-шляхів їх сукупна потужність може перевищувати рівень LOS-променя, а за повної відсутності прямої видимості найсильнішим може виявитися один із NLOS-сигналів, навіть за умови більшої затримки [6].

Затримка при поширенні зростає зі збільшенням частоти та відстанню передачі і посилюється в сприятливих для відбиття середовищах. В зонах з великим шляхом між передавачем та приймачем та за відсутності великої кількості мультишляхових компонент додаткова затримка може бути істотною. Натомість у щільно забудованих урбанізованих зонах із малими комірками покриття та високою концентрацією відбиттів загальна затримка є меншою, проте багатопроневі шляхи більш численні.

Використання сучасних бездротових мереж із короткими комірками та високо спрямованими антенами додатково зменшує затримки, оскільки антени з високим коефіцієнтом підсилення концентрують енергію в обмеженому напрямку, скорочуючи часову розтяжку сигналу та кількість багатопроневих компонентів

Для врахування ефектів малого масштабу важливим є Доплерівський зсув, який може як посилювати, так і ослаблювати багатопроневе загасання залежно від відстані між передавачем і приймачем, оскільки змінюється фазове співвідношення мультишляхових компонент сигналу.

Доплерівський ефект - це видима зміна частоти хвилі, спричинена відносним рухом між джерелом сигналу та приймачем. У бездротових каналах він визначає часову селективність сигналу та спричиняє доплерівське розширення спектра, яке характеризує спектральне розширення сигналу внаслідок змін каналу в часі. Доплерівський ефект впливає на маломасштабне багатопроневе загасання, частотну селективність та час когерентності каналу, а стандартне відхилення частотних зсувів відображає зміни несучої частоти прийнятого сигналу [10].

Його можна описати наступною рівністю:

$$f' = \frac{c+v}{c-v_0} f, \quad (2.6)$$

де f – частота сигналу на передавачі, Гц;

c – швидкість поширення хвилі у середовищі, м/с;

v – швидкість руху приймача відносно джерела, м/с;

v_0 – швидкість руху джерела відносно приймача, м/с.

Доплерівський зсув, що визначається різницею між прийнятою та переданою частотами, можна записати у вигляді:

$$f_d = f' - f = \left(\frac{c+v}{c-v_0} - 1 \right) f. \quad (2.7)$$

Тобто, зі збільшенням несучої частоти ефект Доплера посилюється, що призводить до додаткових проблем при проектуванні бездротових систем. Форма розподілу згасання залежить від ширини променя антени та кількості багатопроменевих компонент. Характер розподілу загасання сигналу визначається шириною діаграми спрямованості антени та кількістю відбитих і розсіяних компонент сигналу. Стабільність каналу, включаючи його затухання та часові характеристики, залежить від таких параметрів, як ширина діаграми спрямованості антени, швидкість переміщення, робоча частота та смуга пропускання. Знову, через меншу довжину хвилі канали міліметрового діапазону характеризуються скороченим часом когерентності та прискореними часовими флуктуаціями. Це, у свою чергу, диктує необхідність застосування коротших кадрів та пакетів даних.

2.4 Моделювання поширення сигналу

Одним із методів оцінки поширення радіосигналів є Ray Tracing яке базується на оптичному підході для чисельного розв'язання рівнянь Максвелла. Цей метод дозволяє оцінювати втрати на шляху, кути приходу та відходу сигналу, а також часові затримки. На відміну від теоретичних та емпіричних моделей, трасування променів не забезпечує простих аналітичних формул для обчислення втрат. Рівняння Максвелла розв'язуються чисельно за допомогою

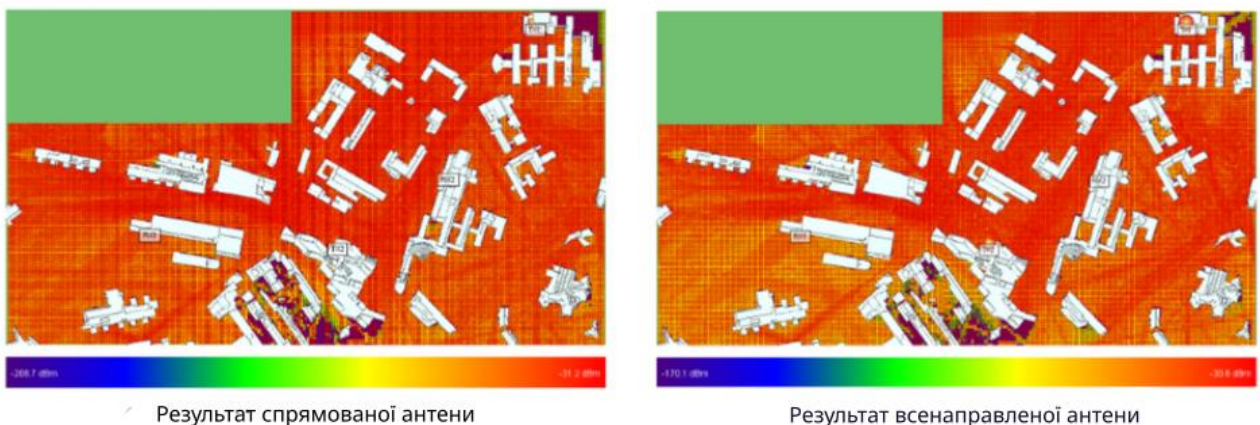
комп'ютерних обчислень. У найпростішому випадку вільного простору існує лише один прямий промінь, що з'єднує передавач і приймач.

Для оцінки поширення сигналу Wi-Fi в умовах міської забудови було проведено моделювання на комерційному програмному забезпеченні Wireless InSite (Remcom), що застосовує трасування променів із врахуванням впливу будівель та рельєфу місцевості. Симуляції виконувалися для частоти 2.4 ГГц, при цьому обчислювалася прийнята потужність, втрати на шляху, інтенсивність електричного та магнітного поля, delay spread, напрямок приходу сигналу та профіль потужності сигналу.

2.4.1 Моделювання в умовах щільної забудови

Спершу моделювалася решітка приймачів розташованих у горизонтальній площині XY для оцінки загальних результатів в умовах щільної забудови міста. Отримана потужність зображена на рисунку 2.6.

Хвилі у смузі 2,4 ГГц мають меншу довжину, ніж ті, що функціонують на нижчих частотах, що зумовлює підвищені втрати під час їх поширення, що наочно підтверджується результатами симуляції, наведеними на рисунку 2.7. Вища частота зменшує проникний потенціал та сприяє інтенсивнішому поглинанню електромагнітних хвиль вологою та атмосферою.



Рисунк 2.6 – Моделювана потужність сигналу у забудованому районі міста

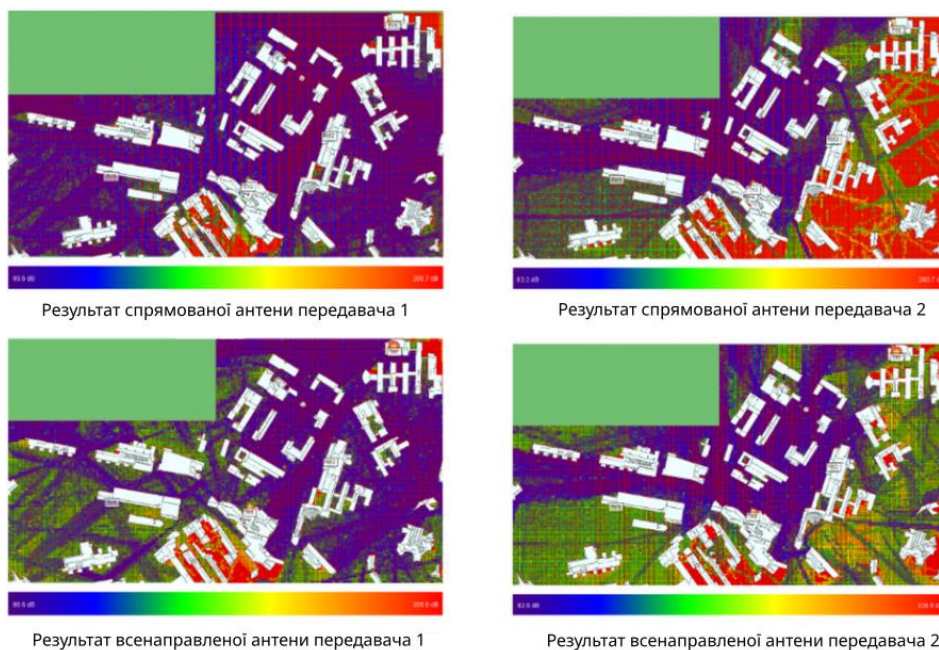


Рисунок 2.7 – Модельовані втрати на шляху у міській забудові

Для оцінки впливу на потужність було проведено моделювання при різній кількості відбиттів радіохвиль від поверхонь. План розміщення передавачів та приймачів наведений на рисунку 2.8.

У таблицях 2.1 – 2.4 наведено отриману потужність та втрати на шляху в різних точках для спрямованої та всенаправленої антен.

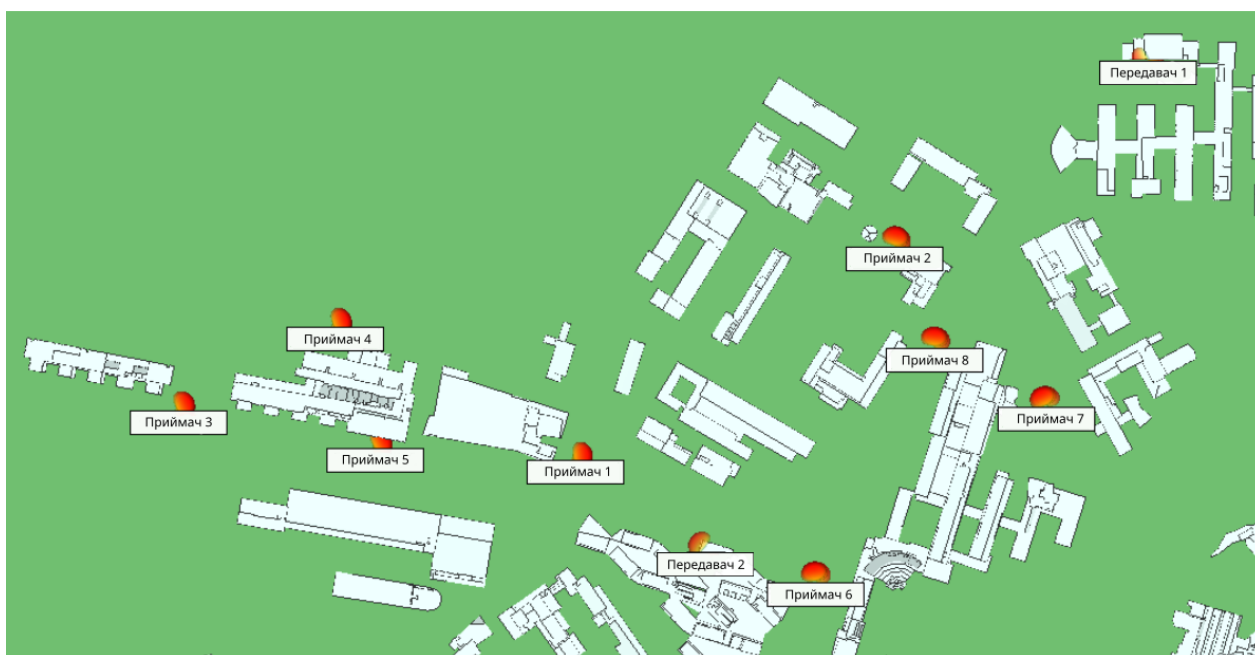


Рисунок 2.8 – Позиціонування пристроїв в забудованому районі

Таблиця 2.1 – Отримана потужність для спрямованої антени при різній кількості відбиттів у забудованому районі

	Передавач 1				Передавач 2			
	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.
Приймач 1	-54,179	-55,924	-56,862	-57,124	-36,578	-36,235	-36,355	-38,024
Приймач 2	-44,814	-44,796	-45,416	-45,558	-62,611	-55,633	-57,227	-85,89
Приймач 3	-69,093	-69,754	-71,124	-81,825	-40,793	-40,736	-39,474	-46,147
Приймач 4	-53,748	-53,743	-53,755	-56,089	-63,494	-63,701	-63,018	-76,216
Приймач 5	-69,112	-70,965	-68,925	-89,289	-36,259	-36,004	-36,364	-42,106
Приймач 6	-52,365	-51,896	-52,041	-52,102	-59,419	-58,813	-61,74	-68,229
Приймач 7	-60,991	-60,428	-64,589	-71,414	-75,817	-76,268	-73,566	
Приймач 8	-45,558	-45,522	-46,158	-43,254	-80,724	-81,196	-87,622	-95,116

Таблиця 2.2 – Отримана потужність для всенаправленої антени при різній кількості відбиттів у забудованому районі

	Передавач 1				Передавач 2			
	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.
Приймач 1	-54,143	-55,883	-56,825	-57,092	-37,052	-36,047	-36,081	-36,589
Приймач 2	-44,543	-44,562	-45,218	-45,431	-60,033	-52,088	-52,24	-71,565
Приймач 3	-68,382	-69,01	-70,283	-80,765	-40	-39,935	-38,655	-45,297
Приймач 4	-53,591	-53,586	-53,599	-55,93	-62,714	-62,458	-59,913	-76,1
Приймач 5	-69,064	-70,935	-68,894	-89,176	-35,682	-35,396	-35,931	-41,455
Приймач 6	-52045	-51,629	-51,773	-51,744	-51,21	-50,719	-46,355	-57,992
Приймач 7	-68,177	-60,179	-63,593	-69,587	-62,068	-62,099	-59,468	
Приймач 8	-45,061	-45,043	-45,669	-42,591	-55,133	-48,056	-64,826	-86,834

Можна виокремити з поміж інших точку під номером 7 першого передавача. В ній у спрямованої антени потужність суттєво вища, оскільки вона концентрує потужність у напрямку променя. Відмінності в потужності також можна спостерігаються у точках 2, 6, 7 та 8 для другого передавача. Тут кращі результати досягаються при використанні всенаправленої антени, оскільки направлена орієнтована на будівлю, а приймачі розташовані в іншому напрямку. Антени також демонструють при зниженні параметру кількості відбиттів зменшення отриманої потужності на виході, так як сумарний вклад променів що дійшли менший.

Таблиця 2.3 – Втрати на шляху для спрямованої антени при різній кількості відбиттів у забудованому районі

	Передавач 1				Передавач 2			
	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.
Приймач 1	112,96	114,705	115,643	115,906	95,359	95,016	95,137	96,897
Приймач 2	103,596	103,577	104,198	104,339	121,392	114,414	116,008	144,67
Приймач 3	127,875	128,536	129,905	140,606	99,575	99,517	98,256	104,928
Приймач 4	112,53	112,524	112,53	114,871	122,275	122,483	121,8	134,997
Приймач 5	127,893	129,747	127,706	148,043	95,04	94,785	95,146	100,888
Приймач 6	111,146	110,678	110,823	10,883	118,201	117,595	120,522	127,01
Приймач 7	119,772	119,21	123,37	130,195	134,599	135,095	132,348	
Приймач 8	104,34	104,303	104,94	102,035	139,506	139,977	146,404	153,898

Таблиця 2.4 – Втрати на шляху для всенаправленої антени при різній кількості відбиттів у забудованому районі

	Передавач 1				Передавач 2			
	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.	6 відб.	3 відб.	1 відб.	0 відб.
Приймач 1	112,924	114,64	115,606	115,873	95,834	94,828	94,863	95,37
Приймач 2	103,325	103,344	103,999	104,212	118,814	110,87	111,022	130,35
Приймач 3	127,164	127,791	129,064	139,547	98,782	98,716	97,436	104,079
Приймач 4	112,373	112,367	112,381	114,711	121,496	121,239	118,695	134,882
Приймач 5	127,845	129,717	127,675	147,975	94,463	94,178	94,712	100,226
Приймач 6	110,926	110,411	110,555	110,525	109,992	109,501	105,136	116,774
Приймач 7	126,958	118,96	122,375	128,368	120,849	120,881	118,25	
Приймач 8	103,843	103,825	104,45	101,372	113,915	106,837	123,608	145,617

Змінюючи матеріал будівель з бетону на цеглу можна побачити явний вплив цього фактору на поширення сигналу на частоті 2,4 ГГц .Окрім зміни матеріалу будівель, змінюється температура з 22,2°C та вологості 50% на -7°C і 85% вологості. Результати експерименту наведені в таблицях 2.5 -2.8.

Зафіксований вплив метеорологічних умов на втрати потужність сигналу становить приблизно 1 дБ. Такі коливання пояснюються зниженням температури на 29,2°C та підвищенням вологості на 35%. Це явно призвело до підвищеного поглинання сигналу.

Таблиця 2.5 – Отримана потужність для спрямованої антени при порівнянні впливу погодних і матеріальних змін у забудованому районі міста

	Передавач 1			Передавач 2		
	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни
Приймач 1	-54,179	-54,097	-57,218	-36,578	-36,735	-36,361
Приймач 2	-44,814	-44,898	-40,362	-32,611	-63,012	-69,446
Приймач 3	-69,093	-69,089	-77,848	-40,793	-40,804	-40,278
Приймач 4	-53,748	-53,709	-53,542	-63,494	-63,463	-58,805
Приймач 5	-69,112	-69,075	-67,7	-36,259	-36,183	-35,302
Приймач 6	-52,365	-52,266	-49,182	-59,419	-59,919	-53,849
Приймач 7	-60,991	-61,611	-72,269	-75,817	-75,822	-74,307
Приймач 8	-45,558	-45,479	-48,331	-80,724	-80,53	-98,497

Таблиця 2.6 – Отримана потужність для всенаправленої антени при порівнянні впливу погодних і матеріальних змін у забудованому районі міста

	Передавач 1			Передавач 2		
	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни
Приймач 1	-54,143	-54,064	-57,187	-37,052	-36,989	-36,263
Приймач 2	-44,543	-44,597	-40,128	-60,033	-61,458	-63,503
Приймач 3	-68,382	-68,384	-77,1	-40	-40,016	-39,462
Приймач 4	-53,591	-53,553	-53,385	-62,714	-62,214	-56,837
Приймач 5	-69,064	-69,025	-67,672	-35,682	-35,611	-34,749
Приймач 6	-52,045	-51,946	-48,735	-51,21	-51,271	-50,457
Приймач 7	-68,177	-69,767	-67,246	-62,068	-62,072	-61,49
Приймач 8	-45,061	-44,982	-47,94	-55,133	-54,996	-53,294

Цегляні стіни в свою чергу створюють значну різноманітність в структурі стін, що часто веде до вищих втрат на шляху та погіршення значення потужності прийнятого сигналу від передавача. Іноді розташування точок відбиття на цегляних поверхнях може покращити силу сигналу та прийом. Але зазвичай ці дифракції та відбиття створюють шкідливу інтерференцію сигналу. Це відбувається, коли фази різних компонентів хвиль деструктивно взаємодіють, зменшуючи загальну продуктивність системи.

Таблиця 2.7 - Втрати на шляху для спрямованої антени при порівнянні впливу погодних і матеріальних змін у забудованому районі міста

	Передавач 1			Передавач 2		
	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни
Приймач 1	112,96	112,878	116	95,359	95,517	95,142
Приймач 2	103,596	103,68	99,144	121,392	121,793	128,228
Приймач 3	127,875	127,87	136,63	99,575	99,586	99,059
Приймач 4	112,53	112,491	112,323	122,275	122,245	117,587
Приймач 5	127,893	127,856	126,481	95,04	94,965	94,083
Приймач 6	111,146	111,048	107,964	118,201	118,701	112,631
Приймач 7	119,772	120,392	131,051	134,599	134,604	133,088
Приймач 8	104,34	1044,26	107,113	139,506	139,312	157,279

Таблиця 2.8 - Втрати на шляху для всенаправленої антени при порівнянні впливу погодних і матеріальних змін у забудованому районі міста

	Передавач 1			Передавач 2		
	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни	Базові умови	Зимові умови	Цегляні стіни
Приймач 1	112,924	112,845	115,969	955,834	95,771	95,045
Приймач 2	103,325	103,379	98,963	118,814	120,24	122,285
Приймач 3	127,164	127,165	135,882	98,782	98,798	98,244
Приймач 4	112,373	112,335	112,167	121,496	120,996	115,619
Приймач 5	127,845	127,807	136,454	94,463	94,393	93,53
Приймач 6	110,926	110,728	107,517	109,992	11,052	109,238
Приймач 7	126,958	128,549	126,028	120,849	120,854	120,272
Приймач 8	103,843	103,763	106,722	113,915	113,778	112,076

3 ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЯ В НАДЩІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ Wi-Fi

Тенденції в розгортанні надщільних бездротових мереж з великою кількістю AP, призводять до ускладнення управління перешкодами в таких висококонкурентних середовищах через накладання базових сервісних наборів OBSS (Overlapping Basic Service Sets), перекриваючи суміжні радіоканали. Це значно погіршує стабільність та продуктивність у сучасних Wi-Fi мережах.

Одним з інструментом для вирішення цієї проблеми є координація декількох точок доступу MAPC (Multi-AP Coordination), при якій точки доступу обмінюються інформацією про стан каналу, навантаження та параметри радіодоступу для узгодженого управління доступним ресурсом спектра. Це можливо завдяки використанню MIMO-антенних систем [8].

Одним із різновидів MAPC є координоване формування променя Co-BF (Coordinated Beamforming), коли сусідні пристрої спрямовують сигнали на конкретних користувачів шляхом узгодження вибору параметрів антенних решіток, що мінімізує взаємні перешкоди та підвищує просторову селективність передачі. Проте так як основна пелюстка є результатом накладання, тобто інтерференції сигналів від окремих елементів антенної решітки, одночасно виникають ще й додаткові локальні максимуми випромінювання. Ці бокові пелюстки можуть створювати перешкоди для приймачів у сусідніх мережах.

На рисунку 3.1 наведено приклад схеми у якому станція 1 асоційована з AP 1, а станція 2 — з AP 2. Обидві точки доступу застосовують формування направлено променя для фокусування сигналу на власних асоційованих станціях з метою підвищення ефективності просторової передачі.

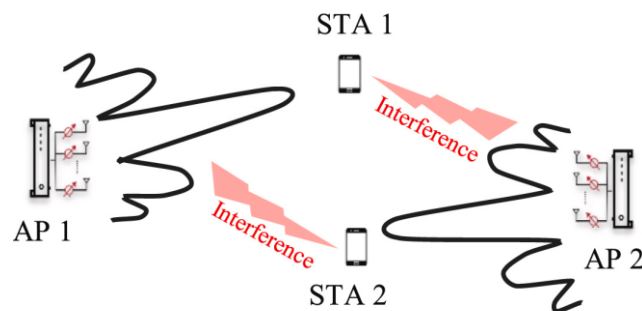


Рисунок 3.1 – Завади при координованому формуванні променя

Варіантом вирішення проблеми є впровадження в бездротові системи використання техніки спрямування нульових зон випромінювання у напрямку сусідніх нецільових станцій (null steering), при якому замість посилення сигналу в напрямку цільового користувача формується глибока мінімізація випромінювання в напрямку джерел завад.

На рисунку 3.2 наведено приклад координованої роботи двох точок доступу, у якому, завдяки обміну інформацією про розташування цільових приймачів та сусідніх станцій, AP застосовують техніку спрямування нульових зон випромінювання. У цьому режимі обидві точки доступу, окрім формування основного променя на власні асоційовані станції, додатково мінімізують потужність випромінювання у напрямку станцій, що обслуговуються сусідніми AP.

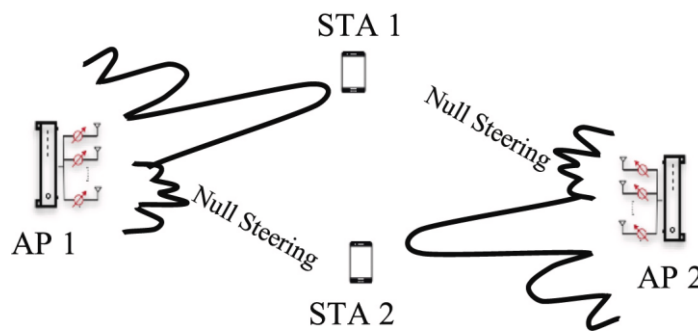


Рисунок 3.2 – Координоване формування променя з використанням null steering

Такий підхід дає змогу обом точкам доступу здійснювати одночасну передачу без взаємних завад, що суттєво підвищує пропускну здатність системи та знижує затримку. Це є складнішим через потребу у точному знанні просторових характеристик каналу та більш обчислювально витратних умовах. Проте воно здатне забезпечити вищий приріст бажаної продуктивності.

AP повинні знати, які станції заплановані на передачу протягом інтервалу ТХОР (transmission opportunity) для оцінки набору джерел потенційної інтерференції. Визначення оптимальної конфігурації формування нулів є складним завданням, оскільки кількість можливих конфігурацій залежить від числа AP, кількості в них антен та числа користувачів у OBSS. Це створює великий простір рішень. Ситуація ускладнюється можливістю безперервного переміщення станцій в просторі. При цьому система має обирати напрямки формування нулів за частки секунди. Тому масштабоване рішення має

спиратися на інтелектуальні стратегії вибору, щоб ефективно визначати найбільш впливові напрямки нулювання без повного перебирання можливих конфігурацій.

Також проблемою стає обмежена кількість доступних ступенів свободи антенної решітки, тобто незалежних просторових каналів, які можна використовувати для формування основного променя або нульових зон. Кожна ступінь свободи може бути використана або для фокусування основного променя на асоційованій станції, або для формування нульових зон у напрямку інших станцій. У багатокористувацьких середовищах кількість напрямків, у яких можна ефективно нулювати перешкоди, обмежена, тому не всі сусідні нецільові станції можуть бути одночасно пригнічені. Крім того, спроби розподілити нульові зони між численними напрямками можуть зменшити ефективність основного променя та загальну продуктивність.

Ці обмеження в застосуванні методів формування променів підводять до пошук більш адаптивних варіантів, які використовують інструменти машинного навчання ML (Machine Learning) для динамічного коригування напрямку пригнічення перешкод підстроюючись під поточні умови передачі в мережі [9].

Інтеграція методів машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням RL (Reinforcement Learning), у системи бездротового зв'язку дозволить суттєво оптимізувати продуктивність мережі та управління ресурсами. RL дозволяє системам динамічно адаптувати стратегії формування променів на основі безперервного моніторингу середовища, що забезпечує ефективне прийняття рішень у реальному часі.

Традиційні підходи використання ML для оптимізації в бездротових мережах переважно зосереджуються на формуванні основного променя. Проте, як зазначалося вище, у надщільних мережах бокові пелюстки випромінювання також є критичним джерелом перешкод. Запровадження навчання з підкріпленням для формування нульових зон дає змогу ефективно пригнічувати ці завади, забезпечуючи швидкий та ефективний вибір напрямків нулювання та динамічну адаптацію до змін положень станцій і стану каналу.

Підхід названий IntelliNull, призначений для зменшення перешкод від сусідніх передавачів через координоване нулювання сигналів при максимізації якості сигналу на кожній станції. Підхід дозволяє спрямовувати промені на цільові станції, при цьому інтелектуально глушачи найбільш впливові завади.

Агент IntelliNull, є централізованою RL-платформою, що постійно адаптується до змін мережевого середовища, включаючи рухомість вузлів, використовуючи CSI зібрану в реальному часі. Інтелектуальне спрямування нулів перевершує традиційні методи, що базуються лише на формуванні променя, забезпечуючи вищий SINR та пропускну здатність, особливо в умовах щільного розгортання Wi-Fi. Система перевершує класичні некординовані методи формування променя та дозволяє застосовувати RL-орієнтоване просторове мультиплексування у OBSS [9].

3.1 Модель системи

Змодельована багатоточкова бездротова мережа яка використовує сумісне формування променя та спрямування нулів з метою оптимізації якості сигналу для кожної станції та мінімізації перешкод між точками доступу.

AP розташовані у фіксованих координатах, не змінюються в часі та відповідають стаціонарній інфраструктурі мережі. Вони функціонують на одному радіоканалі в умовах OBSS, використовуючи необмежений доступ до спектрального ресурсу, що за відсутності координації призводить до зростання взаємних перешкод. Кожен AP оснащений лінійною рівномірною антенною решіткою ULA (Uniform Linear Array) з N_t випромінювачами, розміщеними з однаковим міжелементним інтервалом. ця конфігурація забезпечує можливість формування вузьких спрямованих променів та реалізації нульових напрямків завдяки контрольованому зсуву фаз між елементами. Для узгодження моделі передбачається єдина горизонтальна орієнтація всіх ULA, тобто всі решітки розташовані в одній площині й мають однаковий азимутальний нульовий напрямок, уніфікуючи визначення просторових кутів випромінювання та спрощує опис кутових параметрів сигналу для всіх точок доступу.

Станції, асоційовані з кожним AP, рівномірно та випадково розміщуються в просторі й переміщуються періодично обираючи випадкову цільову точку, рухається до неї з випадковою швидкістю, після чого робить паузу перед вибором наступної точки.

Повна структура системи, зображена на рисунку 3.3, що складається з двох основних складових, а саме компонента RL-агента та компонента середовища передачі, що моделює Wi-Fi мережу.

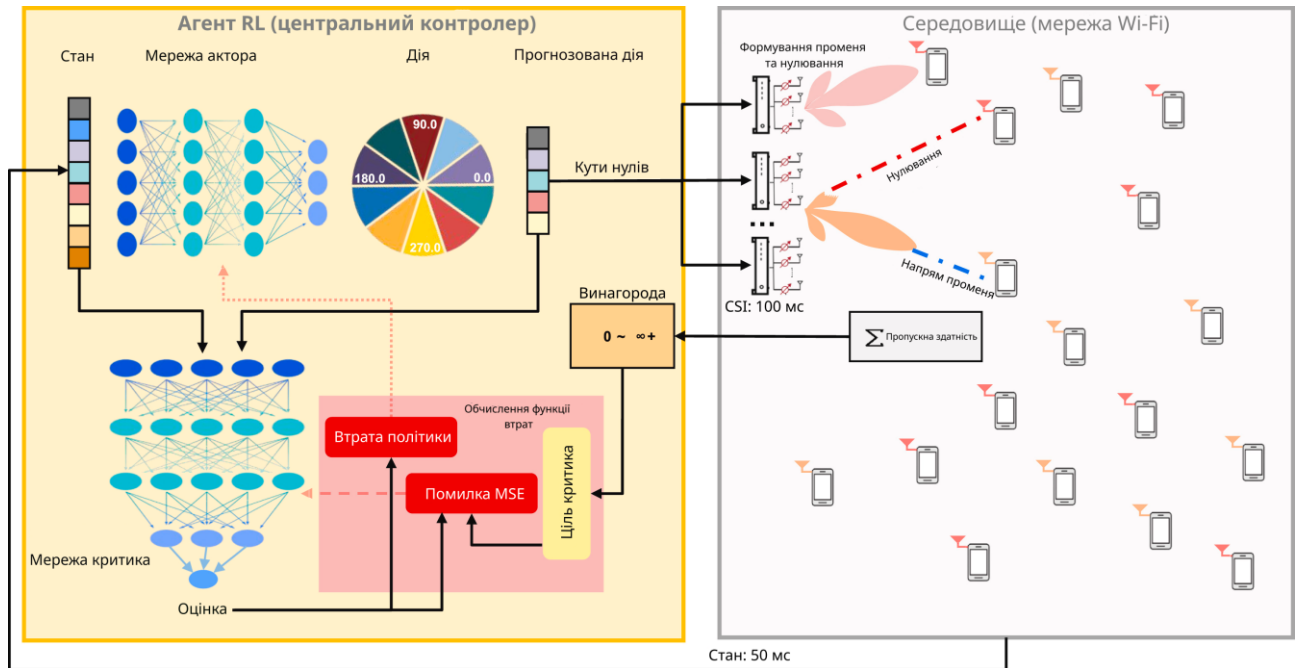


Рисунок 3.3 – Структура RL-агента для управління нульовим спрямуванням

Агент виконує роль центрального контролера, який приймає управлінські рішення для всієї мережі. Він отримує інформацію як про напрямок головного променя від кожного вузла зв'язку до відповідного асоційованого пристрою, так і про згасання сигналу на каналі від усіх точок доступу в системі. Розраховані дирекційні кути та потужності сигналу для кожної станції відносно її точки доступу надсилаються до цього головного рушія, формуючи звіт про поточний стан [9].

Агент із підкріплювальним навчанням приймає актуальний стан як вхідні данні та вирішує, які вектори підлягають нульовому придушенню. Згенеровані рішення передаються відповідним точкам доступу у мережі.

Для опису поширення сигналу використано модель вільного простору FSPL (Free-Space Path Loss), що передбачає існування прямої лінії видимості між передавачем і приймачем. За таких умов вона дає змогу оцінити втрати сигналу, спричинені виключно геометричним розширенням хвилі. Для поверхні сфери радіуса d , густина потоку потужності визначається виразом :

$$W = \frac{P_t G_t}{(4\pi d)^2}, \quad (3.1)$$

де d – відстань між передавачем і точкою вимірювання, м;

P_t – потужність передавача, Вт;

G_t – коефіцієнт підсилення передавальної антен.

Доступна приймальна потужність описується рівнянням Фріса:

$$W = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi d^2}, \quad (3.2)$$

де P_t – потужність передавача, Вт;

G_t – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

λ – довжина хвилі сигналу, м.

Коефіцієнт підсилення приймальної антени можна виразити рівнянням:

$$G_r = \frac{4\pi A}{\lambda^2}, \quad (3.3)$$

де A – ефективна площа антени, м².

Добуток потужності передавача та коефіцієнта підсилення передавальної антени відповідає ефективно випромінюваній потужності ERP (Effective Radiated Power). З урахуванням еталонної відстані d_0 на якій вимірюється базова приймальна потужність для подальших розрахунків втрат на шляху, рівняння приймальної потужності можна подати у вигляді:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left[\frac{d_0}{d} \right]^2. \quad (3.4)$$

Для внутрішніх середовищ зазвичай приймають $d_0=1$ м, а для зовнішніх – у межах від 100 м до 1 км. Для порівняння цієї моделі з іншими її зазвичай переводять у логарифмічну форму, що полегшує аналітичні оцінки [11].

У децибелах рівняння втрат на шляху набуває вигляду:

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32,44, \quad (3.3)$$

де f – частота передаваного сигналу, МГц.

Основні параметри запропонованої координованої Wi-Fi-мережі наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри системи

Параметр	Значення
Частотний діапазон	5 ГГц
Ширина каналу	80 МГц
Показник шуму	7 дБ
Тепловий шум при кімнатній температурі	-174 дБм
Мобільність станцій	1,4 м/с
Тривалість слоту	50 мс
Інтервал отримання CSI	100 мс
Максимальний радіус станції до AP	10 м
Максимальна потужність передавача	20 дБм
Модель втрат шляху	FSPL

Клієнтські станції, асоційовані з точками доступу, здійснюють переміщення в межах території радіусом 10 м, змінюючи свої координати кожні 50 мс при швидкості, характерній для пішого руху (1,4 м/с). У мобільних сценаріях, де абонентські пристрої змінюють просторове розташування в межах однієї або кількох комірок Wi-Fi, частота оновлення параметрів радіоканалу має відповідати їхній динаміці руху, щоб забезпечити актуальність оцінок CSI. У моделі передбачається виконання вимірювань параметрів каналу з інтервалом 100 мс, що є прийнятним для швидкостей пішохідного переміщення та несучої частоти 5 ГГц.

Така асинхронність при оновлення положення станції та зняття показників CSI призводить до застарівання каналної інформації, внаслідок чого система ухвалює рішення на основі неточних даних.

Оцінювання параметрів каналу передачі здійснюється під час процедури channel sounding, яка є складовою механізмом формування направленої променю у стандартах IEEE 802.11ac/ax. У межах sounding точка доступу передає послідовність відомих пілотних символів NDP (Null Data Packet), на основі яких абонентська станція виконує оцінку матриці каналу.

Прийнятий сигнал на стороні станції описується співвідношенням:

$$y=Hx+n, \quad (3.4)$$

де x – вектор переданих пілотних символів;

H – матриця коефіцієнтів каналу, що відображає амплітудно-фазові характеристики середовища;

n – адитивний білий гаусів шум.

На основі цих вимірювань станція формує CSI та передає його назад передавачу. Наявність CSI дає змогу застосовувати техніки формування променя та інтерференційного нулювання, адаптуючи передачу до актуальних умов каналу. Максимізація корисного сигналу для цільового приймача потребує оптимального формування променя - задачі оптимізації, яка, на відміну від нульового спрямування, не має простого аналітичного розв'язку ускладнюється динамічними змінами параметрів каналу в часі, зумовленими рухом станцій та багатопроменевими ефектами [9].

На основі отриманої CSI складається поточна конфігурація формування променя, при якій ваговий коефіцієнт визначає амплітуду та фазу сигналу на кожному елементі антенної решітки. Правильно підібрані вагові коефіцієнти забезпечують конструктивне накладання хвиль у напрямку цільової станції та деструктивне взаємодію у напрямку нецільових приймачів, що підвищує SINR і, в свою чергу, пропускну здатність каналу. Для оптимізації передачі в умовах багатопроменевого розповсюдження ваговий коефіцієнт визначається за формулою:

$$w=(HH^H)^{-1}H^H \cdot e, \quad (3.5)$$

де e – одиничний вектор, що задає бажаний напрям формування променя.

Матриця амплітудно-фазових характеристик каналу H визначає комплексні коефіцієнти взаємодії між антенами передавача та приймачами і описується як:

$$H=[h_1, h_2, \dots, h_{N_u}], \quad (3.6)$$

де h_i – вектор каналу для i -тої станції;

N_u – кількість абонентських станцій у системі.

Вектор вибору e , що задає бажаний напрям формування променя для цільової станції k :

$$e^T = [1, 0, 0, \dots, 0]. \quad (3.7)$$

Перший елемент відповідає цільовій станції, а всі інші — стороннім абонентам. Кожен вектор h_i представляє канал розмірності $N_t \times 1$. Внаслідок цього повна матриця каналу H має розмірність $N_t \times N'_u$, де N'_u — підмножина N_u , що включає цільову станцію та обрані інтерферуючі станції. Така структура дозволяє сформувати оптимальний ваговий вектор w так:

$$H^H w = e. \quad (3.8)$$

Перший елемент вектора e відповідає цільовій станції, тоді як усі інші елементи перетворюються в нуль для придушення сигналів від небажаних джерел інтерференції. Така конструкція забезпечує спрямування променя на канал бажаної станції із контрольованим зменшенням впливу від сторонніх.

Для мінімізації перешкод матриця каналу H формується шляхом поєднання окремих векторів каналів h_i , отриманих у результаті моделювання поширення сигналу. Першим елементом буде йти канал нашої цільової станції, а вже після нього йтимуть канали, котрі відповідають інтерференційним напрямкам, які необхідно придушити.

Традиційні методи оптимізації формування променя у бездротових мережах часто формулюються через задачу мінімізації квадратів помилки для обчислення оптимального вектора спрямованого променя w .

У цьому контексті матриця H^H позначає гермітову транспозицію матриці каналу H , тобто операцію комплексного спряження та транспонування. Використання гермітової транспозиції дозволяє коректно обробляти комплексні значення каналу, забезпечуючи точне проектування сигналу у бажані просторові напрямки та придушення небажаних перешкод. На практиці, у бездротових системах матриця каналу H може втрачати ранг або ставати сингулярною, тобто втрачати достатню кількість лінійно незалежних рядків чи стовпців для обчислення звичайної оберненої матриці. Це відбувається через мобільність користувачів, затухання сигналу або інтерференцію, коли сигнали стають

схожими або слабкими, а частини інформації каналу стають залежними. У таких випадках замість звичайної оберненої застосовується псевдообернена матриця Мура–Пенроуза, яка гарантує стабільне рішення навіть для прямокутних або вироджених матриць, забезпечуючи надійну та обчислювально ефективну побудову вектора спрямованого променя в динамічних і шумних умовах [9].

Номінальна потужність на виході для AP_i встановлюється на рівні 20 дБм. Для більш точного моделювання реального зменшення показника потужності сигналу при поширенні використовується поєднання FSPL та логнормального затінення, що враховує вплив сторонніх об'єктів. Логнормальне затінення n моделює випадкові коливання потужності сигналу через локальні перешкоди й описується нормальним розподілом у логарифмічній шкалі:

$$n \sim N(0, \sigma^2), \quad (3.9)$$

де σ – стандартне відхилення, що характеризує ступінь варіативності сигналу, дБ.

Модель згасання траєкторії визначається рівнянням Фріза:

$$PL_{fs}(d) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right), \quad (3.10)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, м/с.

З врахуванням реальних перешкод через логнормальне затінення:

$$PL(d) = \begin{cases} PL_{fs}(d) + n, & \text{if } d \leq 10. \\ PL_{fs}(10) + 103,5 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{10} \right) + n, & \text{if } d > 10. \end{cases} \quad (3.11)$$

В поданій системі дисперсія σ^2 становить 4, що відображає типові прояви логнормального затінення всередині будівель. Це дає змогу досягти балансу між точністю відтворення змін у каналах і забезпеченням стійкості навчального процесу. FSPL розраховується для дистанції 10 метрів, а на більших відстанях вводиться логнормальне загасання з показником ступеня 3,5, що імітує вплив стін та інших перешкод на сигнал.

Малі масштаби затухання моделюються за допомогою статистичної моделі Rician fading, у якій канал містить домінуючий LOS компонент прямої видимості разом із кількома слабшими розсіяними багатопроменевими шляхами. Такий тип затухання відрізняється наявністю вираженого детермінованого складника сигналу, що робить його більш стабільним порівняно з Rayleigh fading, де LOS-компонента відсутня.

Загальна потужність сигналу P на приймачі можна визначити рівнянням:

$$P_{rx,k} = P_{tx,i} \cdot 10^{-PL(d)/10} \cdot |h_{i,k}^H w|^2, \quad (3.12)$$

де $P_{tx,i}$ – передана потужність, дБм;

$PL(d)$ – втрати траєкторії, дБ;

$h_{i,k}$ – вектор каналу від точки доступу до станції.

Сумарна потужність інтерференції, що фіксується на точці доступу k , формується за рахунок зведення внесків від усіх точок доступу, що заважають:

$$P_{mt,k} = \sum_{j \neq 1} P_{tx,i} \cdot 10^{-PL(d_{j,k})/10} \cdot |h_{j,k}^H \cdot w_j|^2, \quad (3.13)$$

де $P_{tx,j}$ – потужність передавача, що перешкоджає AP_j , дБм;

$PL(d_{j,k})$ – втрати траєкторії від AP_j до станції k , дБ;

$h_{j,k}$ – комплексний вектор каналу від AP_j до станції k ;

w_j – вектор beamforming AP_j .

Величина $|h_{j,k}^H \cdot w_j|^2$ характеризує виграш інтерферуючого сигналу, отже демонструє, наскільки напрямок променя від AP_j відповідає каналу станції k , та яку саме частину випущеної енергії ця станція реально вловлює.

Для станції k SINR обраховується за наступною рівністю:

$$SINR_k = \frac{P_{rx,k}}{P_{int,k} + P_{noise}}, \quad (3.14)$$

де $P_{rx,k}$ – прийнята потужність сигналу від цільового AP, дБм;

$P_{int,k}$ – сумарна потужність інтерференції від небажаних передавачів, дБм;

P_{noise} – шумова потужність на приймачі, дБм.

Термічний шум розраховується з огляду на смугу пропускання та ступінь нагріву. За умов звичайної кімнатної температури, рівень теплового шуму сягає близько -174 дБм, і його величина зростає прямо пропорційно до ширини каналу. До загальної складової шуму додається ще й коефіцієнт шуму самого приймального пристрою, який у цьому випадку фіксується на позначці 7 дБ [9].

Сумарна потужність шумового діапазону визначається як:

$$P_{noise} = -174 + 10 \cdot \log_{10}(B) + 7, \quad (3.15)$$

де B – ширина каналу, Гц.

Кількість бітів, що може бути передана за певний часовий інтервал, обчислюється на основі формули:

$$R_k = T_{slot} \cdot B \cdot \log_2(1 + SINR_k), \quad (3.16)$$

де T_{slot} – тривалість часової алокації, с.

У даній моделі задіяно часовий відрізок тривалістю у п'ятдесят мілісекунд, що узгоджується зі стандартними характеристиками виділення ресурсів у системах бездротового зв'язку з великою кількістю абонентів. Налаштування ширини бездротового каналу зафіксовано на позначці у 80 мегагерц. Таке значення гарантує необхідний обсяг пропускної здатності для оперативного пересилання даних, а також забезпечує правильне моделювання теплового шуму, чутливого до змін температури, який зростає відповідно до розмірів частотного спектра.

Загальна пропускна спроможність мережі визначається і надсилається назад у вигляді зворотного зв'язку для RL агента.

3.2 Алгоритм на основі навчання з підкріпленням

Для досягнення сфокусованого формування променя до станцій призначення з одночасним придушенням завад у бік нецільових приймачів у системі IntelliNull, використовується модель навчання з підкріпленням DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) [8].

DDPG належить до методів навчання з підкріпленням, що базується на актор критичній архітектурі і призначена для оптимізації керування в середовищах із неперервними просторами дій. У запропонованій моделі актор визначає керуючу політику агента, яка формує однозначну реакцію на поточний стан та динаміку в бездротовій мережі. Критик, у свою чергу, оцінює якість цих дій, апроксимуючи функцію якості та обчислюючи очікувану винагороду за дотримання поточної стратегії. Таким чином, актор відповідає за генерування керувальних сигналів, а критик за їх формальне оцінювання. Така взаємодія забезпечує адекватний напрямок градієнтного оновлення та стабільне навчання в у неперервному просторі керувальних параметрів.

Поточний стан системи передається мережі критика, яка визначає очікувану цінність для цього стану та дії, що була застосована до цього. Генерується передбачувана оцінка, яка потім зіставляється із фактичною винагородою за допомогою метрики середньоквадратичної помилки MSE (Mean Squared Error). Ця метрика слугує мірилом для безперервного, поетапного вдосконалення, яке виконується ітеративно з метою її мінімізації. На кожному етапі оптимізації розрахована помилка MSE використовується для коригування політики мережі актора, що, своєю чергою, веде до більш якісного вибору дій агентом і, як наслідок, до зростання загальної ефективності мережі.

Алгоритм поєднує властивості політико орієнтованих методів, які безпосередньо апроксимують керуючу політику агента, і орієнтованих на оцінку значень, що моделюють функцію цінності стану або пари стан дія. У такій інтеграції використовуються сильні сторони DQN (Deep Q Network), який наближає оптимальну Q-функцію, та DPG (Deterministic Policy Gradient), що забезпечує обчислення детермінованого градієнта політики для неперервних завдань керування. Q-функція у цій моделі визначає очікувану сумарну винагороду агента за виконання певної дії в поточному стані та подальше слідування обраній політиці, що дає можливість кількісно оцінювати корисність кожного рішення [9].

Такий підхід забезпечує стабільне та ефективне навчання в умовах, де простір дій представлений неперервними параметрами. У досліджуваній системі він описується множиною можливих кутів нульового спрямування, які агент прогнозує для кожної точки доступу з метою максимізації пропускну здатності та мінімізації інтерференції

Агент працює з неперервними значеннями параметрів формування променя, зокрема з неперервними кутами нульового спрямування. У дискретному просторі він був би обмежений фіксованим набором наперед визначених напрямків, що могло б спричинити втрату потенційно оптимальних значень, розташованих між двома дискретними кутовими точками. Натомість, безперервна множина можливих дій дає змогу досягнути увесь спектр наявних векторів, завдяки чому зростає як коректність, так і продуктивність застосовуваної методики.

Для наочної демонстрації роботи алгоритму, на рисунку 3.4 зображено блок-схему його ключових етапів. Вона ілюструє послідовність дій RL-агента та взаємодію точок доступу з асоційованими та неасоційованими станціями, починаючи від моменту збору даних про канал, через формування набору даних для спостереження, і до передбачення оптимальних кутів для нульового спрямування та створення вектора вагових коефіцієнтів для антени.

На початку своєї роботи RL-агент ініціалізується випадковими вагами. Усі AP збирають CSI від асоційованих станцій через каналне вимірювання згідно рівняння 3.4. Зведення траєкторних втрат та кутових показників для усіх станцій формує простір спостережень, котрий виступає як представлення поточного стану середовища передачі для агента. На основі сформованого простору спостережень агент обирає кути нульового спрямування з метою придушення найбільш вагомих джерел інтерференції від сусідніх станцій.

Структура простору спостережень має наступний вигляд:

$$s = \{(\phi_0, PL_0)\}, \{(\phi_1, PL_1), \dots, (\phi_{M_{OBSS}}, PL_{M_{OBSS}})\}, \quad (3.17)$$

де ϕ – кут від AP до асоційованої станції k ;

PL – втрати траєкторії для асоційованої станції, дБ;

M_{OBSS} – кількість сусідніх перекриваючихся базових станцій.

Перші два елементи простору спостережень описують параметри цільової станції. Наступні елементи представляють сусідні станції OBSS, що включає їхні кути нульового спрямування та величинами втрат сигналу. Таке подання даних дає змогу агенту брати до уваги ефект сторонніх завад.

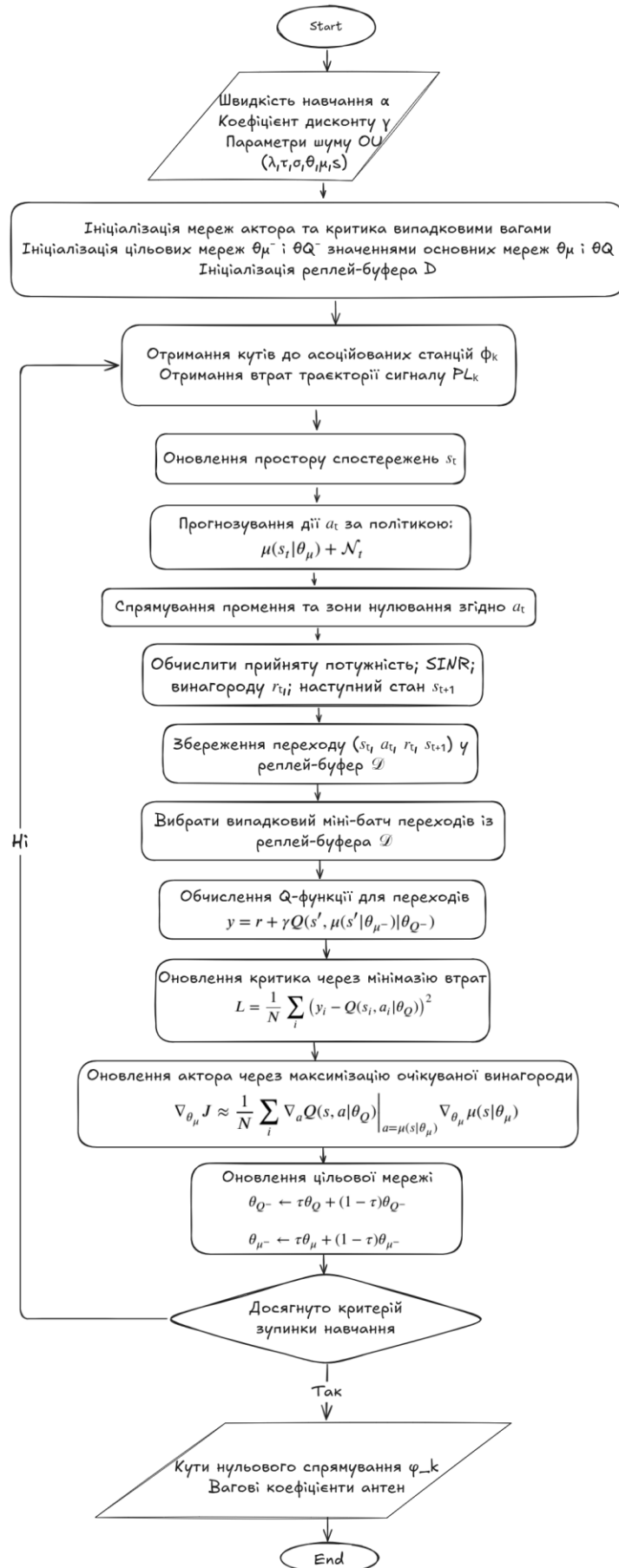


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму керування формуванням направленою променя з використанням RL-агента

Після формування простору спостережень агент прогнозує повний або частковий набір кутів нульового спрямування відповідно до їхнього очікуваного впливу на функцію нагороди, що демонструє якість передачі та ступінь приглушення перешкод. На підставі цих обраних кутів точки доступу формують вагові коефіцієнти для антенних решіток ULAs, керуючись зазначеним рівнянням 3.5.

Після спрямування сигналу на асоційовану станцію, обчислюється прийнята потужність сигналу відповідно до рівняння 3.12 та визначається рівень завад згідно з формулою 3.13. Спираючись на отримані величини, для кожної станції встановлюється показник SINR згідно з рівнянням 3.14, а пропускна спроможність визначається як винагорода за формулою Шеннона 3.16. Загальна пропускна здатність, отримана від усіх станцій, передається агенту із застосуванням RL як сигнал винагорода, супроводжуючись актуалізацією стану середовища, що уможливорює динамічне вдосконалення спрямування променя. Зібрані спостереження зберігаються у реплей-буфері D для навчання, при якому агент оновлює політику на основі досвіду, отриманого від попередніх або випадкових дій. З реплей-буфера формуються міні-батчі переходів, які використовуються для стохастичного градієнтного оновлення політики та функції цінності агента, підвищуючи стабільність і ефективність процесу навчання.

Після кожної ітерації взаємодії агента зі середовищем із реплей-буфера випадковим чином відбирається міні-батч з попередніх досвідів. Для кожного переходу обчислюється цільове значення Q-функції, що забезпечує стабілізацію процесу навчання. У рамках DDPG виконується зворотне поширення помилки, при цьому MSE для кожного Q-значення визначається відповідно функції втрат:

$$L_{critic} = MSE(Q_{current}, Q_{target}), \quad (3.18)$$

де $Q_{current}$ – поточне значення Q-функції;

Q_{target} – цільове значення Q-функції.

Вагові коефіцієнти мережі корегуються, спираючись на функцію втрат, пропорційно їхньому внеску щодо загальної отриманої вигоди. Після цього мережа актора оновлюється за допомогою градієнта очікуваної винагороди відносно параметрів політики, який обчислює напрямок зміни параметрів для

максимізації середньої винагороди і спрямовує агента на вибір дій з найбільшим очікуваним виграшем.

Параметри актора та критика оновлюються методом м'якого оновлення шляхом змішування їхніх параметрів із параметрами поточних мереж за малим коефіцієнтом, що забезпечує плавніше та стабільніше навчання. Така послідовність дій дозволяє агенту ітеративно вдосконалювати стратегію нульового спрямування, адаптуючись до динаміки мережі та мінімізуючи інтерференцію. Параметри мереж актор–критик наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри мереж актор–критик

Параметр	Значення
Розмір простору дій	Залежить від топології мережі
Розмір простору станів	Залежить від топології мережі
Приховані шари актора/критика	[400, 300]
Ємність буфера	100,000 зразків
Швидкість навчання актора	0,0001 крок/ітерація
Швидкість навчання критика	0,001 крок/ітерація
Оптимізатор	Adam
Функція втрат	MSE
Коефіцієнт дисконту γ	0,99
Розмір батчу	1024
Коефіцієнт дискретизації OU λ	0,9995
Параметр плавності OU τ	0,00
Інтенсивність дифузії U σ	0,20
Дрейф до середнього OU θ	0,15
Середнє значення шуму OU μ	0,0
Початкове значення шуму OU s_{OU}	1,0

Простори станів та дій визначаються конкретною топологією Wi-Fi мережі. Зі збільшенням топології мережі відповідно зростають простори станів та дій, що забезпечує агенту можливість ухвалювати більш оптимальні рішення

для конкретної конфігурації мережі. Швидкості навчання для мереж актора та критика становлять 0,0001 та 0,001 відповідно, розмір буфера — 100,000 зразків, а розмір батчу — 1024, що дозволяє агенту ефективно навчатися на різноманітних минулих досвідах у складному середовищі [9].

3.3 Оцінка продуктивності методу

Для комплексної оцінки ефективності IntelliNull проведено комплекс моделювань у багатоточкових Wi-Fi-сценаріях із варіюванням показників щільності точок доступу, кількості антенних елементів та динаміки мобільності кінцевих користувачів. Базова конфігурація охоплює множину AP із різною кількістю асоційованих станцій, що переміщуються в межах робочого радіуса та формують характерні умови перекриття OBSS.

Для забезпечення коректності порівняння IntelliNull співставляється з трьома концептуально різними підходами. Першим є схема, що передбачає ідеальне знання CSI та апіорно визначені оптимальні напрямки формування променя і null. Другим виступає актуальна SOTA (State of the Art) стратегія, тобто найефективніші наявні методи, рекомендовані в аналітичних оцінках IEEE 802.11bn. Використання SOTA-методів дозволяє порівнювати нові підходи з сучасними лідерами галузі, що є критично важливим для оцінки ефективності і забезпечення релевантності результатів дослідження. У даному випадку SOTA-стратегія побудована на фіксованих інтерференційних правилах. Третім є неконтрольоване випадкове null-steering, у межах якого напрямки нульового випромінювання формуються рівноймовірно відповідно до доступного простору ступенів свободи [12].

Використання зазначених методів в ідентичних топологічних, радіочастотних і трафікових умовах, дозволить кількісно оцінити якість RL-керованого механізму відведення інтерференції порівняно з еталонними та неконтрольованими підходами.

3.3.1 Порівняння з сучасними підходами

Змодельовано дві AP, що працюють у діапазоні 6 ГГц із шириною каналу 160 МГц та часовим слотом 50 мс. Точки доступу обладнані чотирма антенами та має по одній асоційованій станції. Затримка збору CSI, варіюється від 0 мс до

2 мс, імітуючи реальні накладні витрати системи. Порівняльні результати подано у вигляді гістограм на рисунках 3.5 і 3.6.

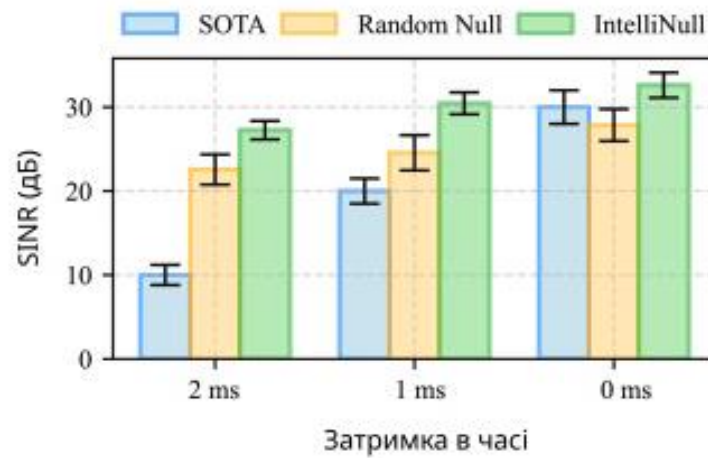


Рисунок 3.5 – Вплив затримки CSI на SINR для різних стратегій

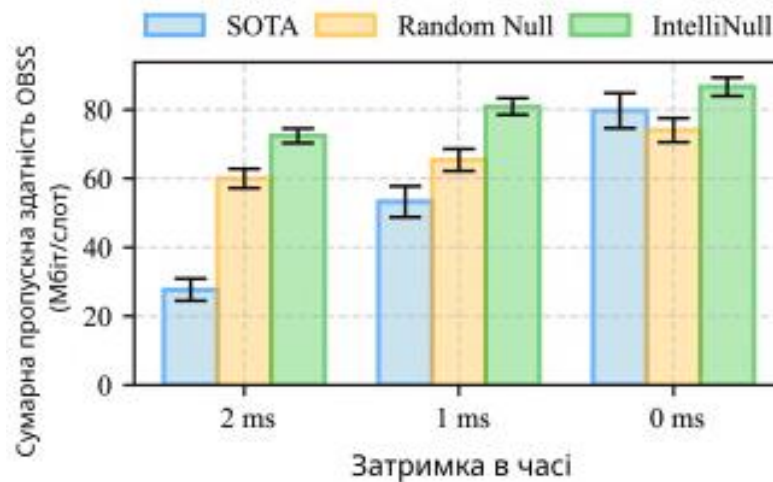


Рисунок 3.6 – Вплив затримки CSI на сумарну пропускну здатність для різних стратегій

За умов актуального CSI, тобто при затримці 0 мс, система IntelliNull демонструє SINR понад 32 дБ та сумарну пропускну здатність понад 85 Мбіт/с. Навіть при збільшенні затримки CSI до 2 мс продуктивність залишалася стабільною, тоді як показники SOTA та випадкового null-steering істотно погіршувалися. Зокрема, SOTA зазнає зниження SINR більш ніж на 20 дБ і пропускну здатності майже на 60 Мбіт/с, тоді як IntelliNull утримує високий

рівень ефективності із втратами менше ніж 5 дБ за SINR та 15 Мбіт/с за пропускну здатністю, що свідчить про її підвищену стійкість до неактуальних показників CSI.

Випадкове відведення використовує всі доступні степені свободи, проте не має просторової селективності та часто нейтралізує незначущі напрями інтерференції, що обмежує приріст продуктивності та збільшує розсіяння результатів. Стратегія SOTA показує переваги за наявності близьких до ідеального показників CSI, проте її дієвість відчутно спадає при наростанні часового відставання, через брак гнучкості. На відміну від цих підходів, IntelliNull, навчена пріорітизувати критично важливі напрями інтерференції та спрямовувати null у найбільш важливі шляхи, здійснюючи дієве придушення завад і оптимальне просторове повторне використання ресурсів каналу зв'язку навіть за неповних або застарілих даних CSI.

3.3.2 Вплив на формування променя

Досліджується вплив формування нульових зон випромінювання на пропускну здатність та форму антенного променя в сценарії з двома точками доступу. Для базового експерименту використано лише класичне beamforming без відведення нулів, що слугує контрольним сценарієм.

Тут точки доступу AP_A та AP_B мають номінальне підсилення 10 дБ і по одній асоційованій станції. На рисунку 3.7 наведено кругові діаграми направленості антен точок доступу, які ілюструють розподіл підсилення до станцій та демонструють базову форму основного й бічних пелюстків без застосування методу спрямування нульових зон.

Для порівняння на рисунку 3.8 наведено кругові діаграми вже з використанням null steering. Чорна пунктирна лінія вказує напрямок формування нульових зон, спрямованих на станції-джерела інтерференції. Внаслідок відведення нулів номінальне підсилення антени зменшується на 8,98 дБ для AP_A та на 9,79 дБ для AP_B , що ілюструє компроміс між пригніченням перешкод і підтриманням основного променя.

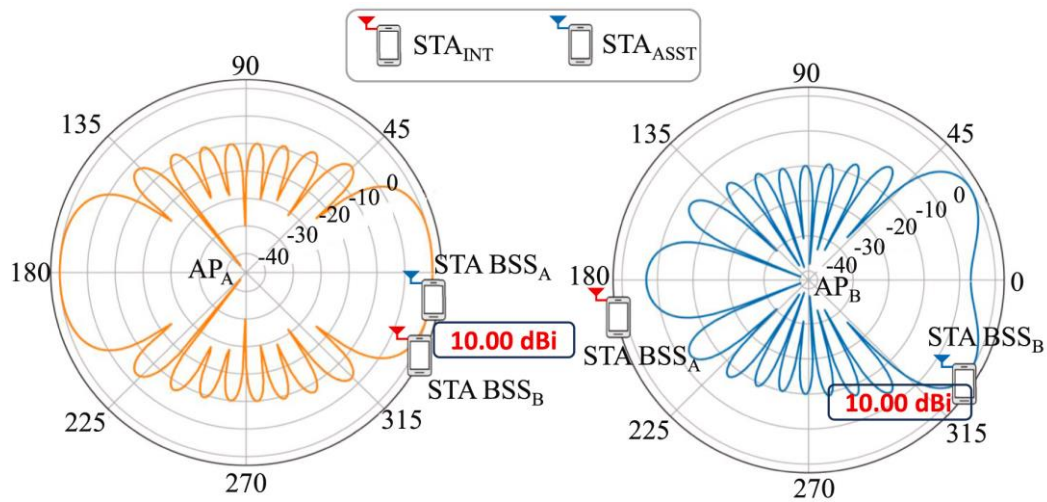


Рисунок 3.7 – Кругові діаграми направленості антени без null steering

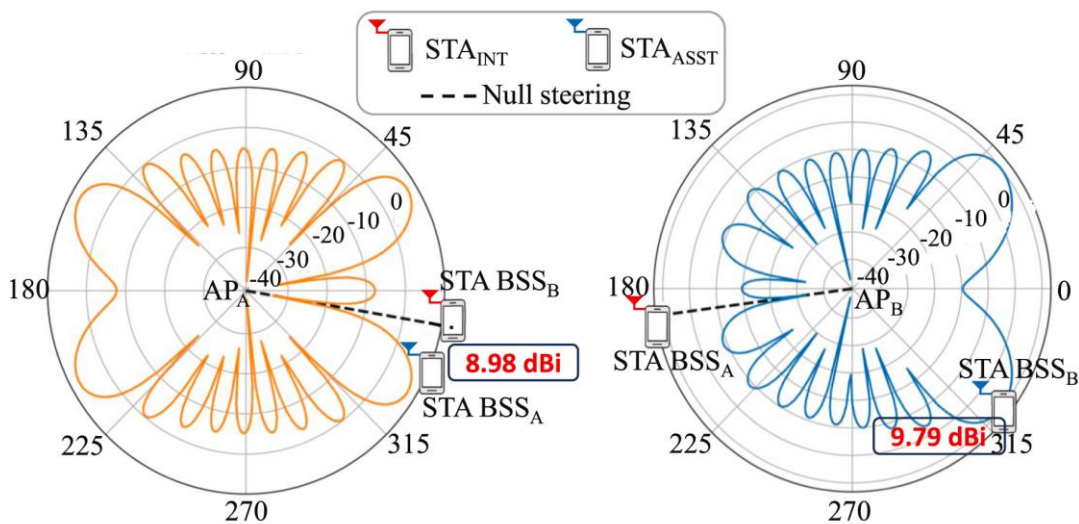


Рисунок 3.8 – Кругові діаграми направленості антенного променя з формуванням нульових зон

Для оцінки впливу формування нульових зон на продуктивність мережі були виміряні та побудовані залежності пропускної здатності від часу для сценаріїв із класичним методом та із застосуванням спрямування нульових зон. Результуючі графіки наведено на рисунках 3.9 і 3.10.

Навіть якщо номінальне підсилення антени знижується, пропускна здатність залишається вищою. Орієнтуючи нульові зони на джерела завад, точки доступу ефективно пригнічують перешкоди, що підвищує продуктивність передачі даних до цільових станцій. У сценарії з лише beamforming спостерігається значне зниження пропускної здатності через посилену взаємну інтерференцію між сусідніми пристроями.

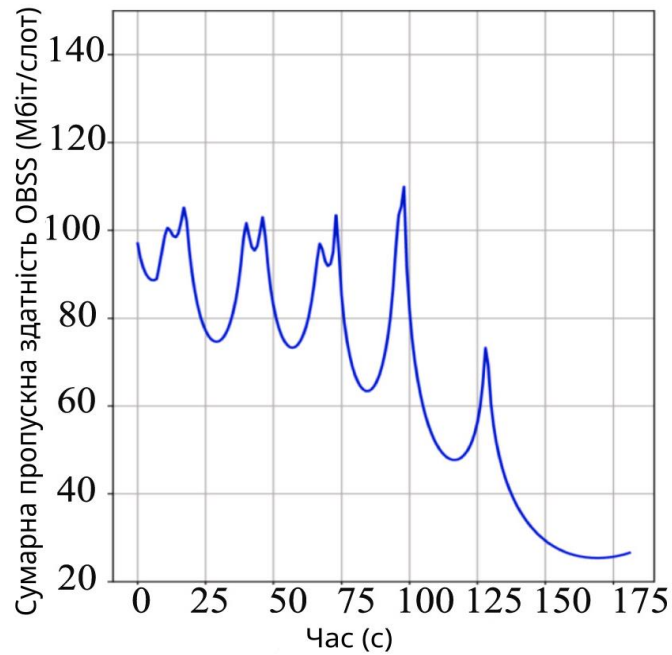


Рисунок 3.9 – Пропускна здатність в сценарії без нулювання

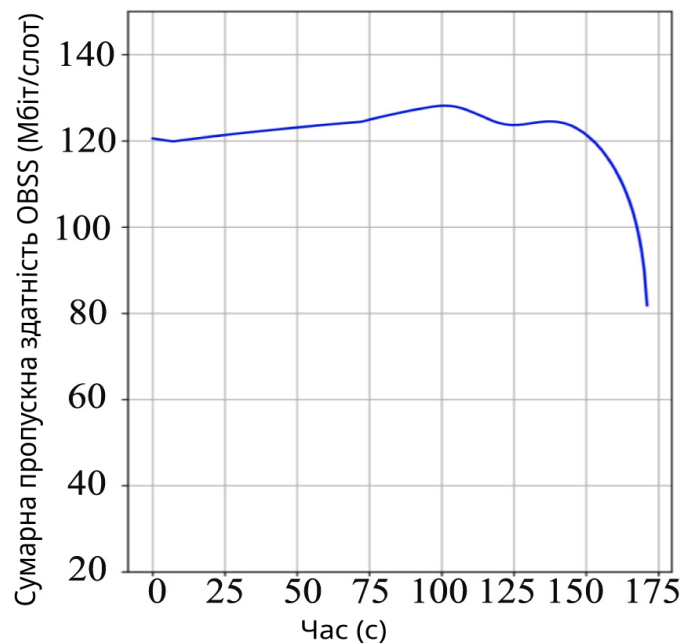


Рисунок 3.10 – Пропускна здатність в сценарії з нулюванням

Незважаючи на переміщення станцій, пропускна здатність з null steering залишається стабільною, демонструючи переваги динамічного відведення нулів у підтриманні надійного зв'язку. При цьому деградація пропускної здатності у сценарії з null steering становить близько 80 Мбіт, значно менше ніж у випадку лише beamforming, де вона падає до приблизно 20 Мбіт. Це зумовлено тим, що

класичне формування променя не завжди забезпечує оптимальні умови каналу для рухомих станцій у певних просторових точках.

3.3.3 Вплив кількості точок доступу

Було проведено низку випробувань, під час яких варіативно змінювалися налаштування мережевої конфігурації, а саме число точок доступу, елементів антени та абонентських станцій. Метою було оцінити здатність алгоритму IntelliNull підтримувати стабільну пропускну здатність у більш насичених та інтерференційно складних сценаріях.

На рисунку 3.11 зображено, як показники алгоритму співвідносяться з ідеальним еталоном та стандартним методом. Світлі фонові криві відображають миттєві значення пропускну здатності протягом навчання, тоді як насичені криві на передньому плані представляють ковзне середнє, отримане шляхом усереднення сусідніх точок у фіксованому часовому вікні. Таке згладжене представлення дозволяє відокремити довгострокову тенденцію від короточасних коливань і наочно демонструє динаміку адаптації та швидкість збіжності алгоритму. Етапи відповідають кількості разів, коли агент навчання взаємодівав із змодельованим середовищем, що дає змогу проаналізувати як початковий етап освоєння, так і досягнутий рівень функціональності.

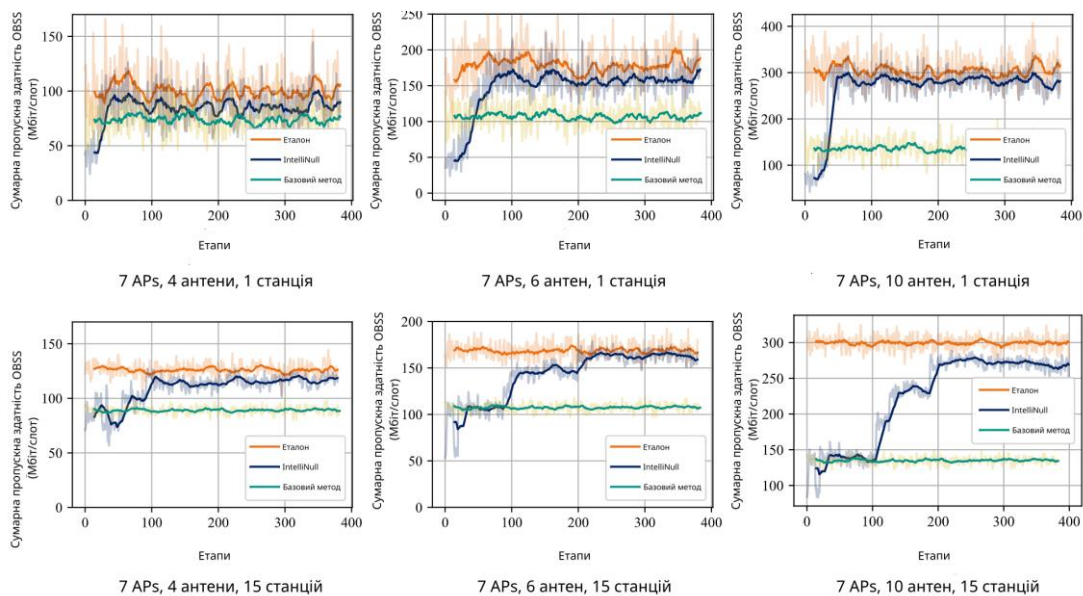


Рисунок 3.11 – Продуктивність та динаміка збіжності IntelliNull для різних конфігурацій мережі

У найпростішому сценарії, що передбачає наявність лише однієї станції, алгоритм IntelliNull демонструє швидку збіжність до режиму, який кількісно наближається до еталонного. Спостерігається, що темп збіжності практично не змінюється зі збільшенням кількості антен на точці доступу, що вказує на слабку залежність процесу навчання від розмірності антенної решітки. Водночас приріст кількості антен безпосередньо підвищує абсолютний рівень досяжної пропускну здатності, оскільки розширений просторовий ступінь свободи покращує формування спрямованих діаграм та ефективність просторового розділення сигналів.

У складніших конфігураціях мережі, де суттєво зростає розмірність простору рішень для формування променя та подавлення інтерференції, спостерігається помітне збільшення тривалості збіжності алгоритму. Зокрема, при розгляді 15 активних станцій та масштабуванні кількості антен на AP від 4 до 10 інтервал збіжності суттєво розширюється: приблизно до 100 епізодів для сценарію з 7 рухомими станціями та до близько 230 епізодів у випадку конфігурації зі 105 рухомими станціями. Після досягнення стаціонарного режиму середня сумарна пропускну здатність стабілізується, а її флуктуації залишаються незначними, що свідчить про стійкість сформованої політики.

У всіх протестованих сценаріях базовий підхід, який обмежується лише формуванням основного променя без реалізації нульових скерованих напрямків, демонструє істотно нижчу ефективність порівняно як з IntelliNull, так і з теоретичним еталонним методом. Це підтверджує критичну роль комплексного поєднання спрямованого формування променя та адаптивного відведення null для мінімізації міжстанційної інтерференції у щільних бездротових середовищах. Незважаючи на збільшений час збіжності у високонавантажених умовах, запропонований підхід на основі ML забезпечує продуктивність, що істотно наближається до оптимальної [9].

Окрім самого лише погляду на абсолютні показники пропускну спроможності, критично значущим є з'ясування, наскільки близько IntelliNull походить на роботу еталонного методу. Для цього розглядається динаміка різниці між отриманою винагородою IntelliNull та відповідними значеннями еталонного підходу. Узагальнені результати наведено на рис. 3.12, де простежується виразна та повторювана закономірність для всіх протестованих конфігурацій кількості антен та станцій.

З самого початку, на перших етапах, розбіжність є досить значною, що, звісно, ілюструє початковий фазу навчання, коли політика агента ще не сформована. В міру того, як відбувається процес пристосування, ми бачимо, як ця різниця швидко зменшується, а потім виходить на сталу траєкторію, зазвичай коливаючись у межах 10–15 відсотків. Цей факт демонструє, що IntelliNull спроможна оперативно досягти рівня якості еталонного методу, навіть не маючи повного уявлення про поточний стан мережі.

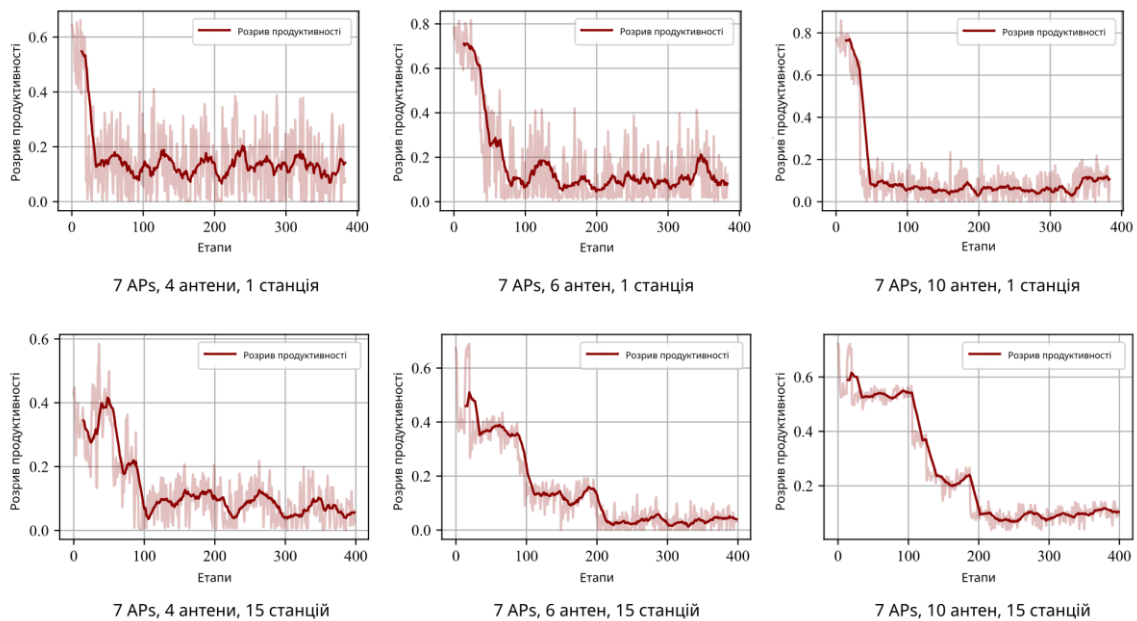


Рисунок 3.12 – Різниця у продуктивності між IntelliNull та еталонним для різних конфігурацій

Після досягнення плато, залишок демонструє незначні коливання, що цілком типово для ситуацій, де простір рішень має високу розмірність, як-от при наявності значної кількості передавачів чи вузлів. Такі коливання вказують на те, що хоча метод IntelliNull дуже точно наближається до ідеальних параметрів, підвищена складність оточення іноді спричиняє незначні невідповідності у діях, які обирає система. Попри це, загалом апаратна платформа виявляє стійку та передбачувану динаміку, що підтверджує її життєздатність для експлуатації у сучасних щільних бездротових системах.

ВИСНОВКИ

Метою кваліфікаційної роботи магістра було дослідження ефективності побудови Wi-Fi мереж нового покоління із застосуванням скоординованого формування направленої променя та інтелектуального керування нульовими напрямками на основі навчання з підкріпленням.

У роботі проведено аналіз ключових факторів, що впливають на поширення сигналу у щільно розгорнутих бездротових середовищах, зокрема явищ відбиття, дифракції та розсіювання, а також метеорологічних умов. Встановлено, що властивості будівельних матеріалів та структура середовища значно впливають на втрати сигналу та створюють деструктивну інтерференцію, що знижує стабільність прийому сигналу.

Проведено моделювання роботи алгоритму IntelliNull на основі нейронної мережі з навчанням з підкріпленням для інтелектуального формування нульових зон у рамках скоординованого формування променя. Алгоритм динамічно визначає критично важливі напрями інтерференції та ефективно пригнічує перешкоди, одночасно підтримуючи основний промінь на цільовій станції. Результати симуляцій показали підвищення SINR, сумарної пропускну здатності та стабільності передачі даних порівняно з класичною роботою алгоритмів MIMO та їх сучасними стратегіями при роботі з направленим сигналом. Дослідження підтвердило, що система IntelliNull успішно масштабується при збільшенні кількості точок доступу, антен та станцій, забезпечуючи високу ефективність у щільно розгорнутих мережах навіть за умов неповної або затриманої CSI.

Результати дослідження підтверджують, що інтеграція традиційних принципів організації частотних ресурсів із скоординованим формуванням променя та інтелектуальним керуванням нулями є перспективним методом підвищення продуктивності, спектральної ефективності та надійності Wi-Fi мереж у щільно населених районах міста та інтерференційно складних середовищах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Shinde S. R. Avoiding interferences in WLAN 802.11b for partially overlapped channels / S. R. Shinde, M. L. Dhore, J. B. Karande. // International Conference on Advances in Computing, Communication and Control. – 2009. – С. 2.
2. Channel Selection in Uncoordinated IEEE 802.11 Networks Using Graph Coloring [Електронний ресурс] / [J. M. Gimenez-Guzman, M. Ivan, H. Enrique та ін.] // MDPI. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/13/5932>.
3. Diaz J. WiFi Best Practice – WiFi Channels allocation and configuration. [Електронний ресурс] / Jorge Diaz // JD Tech Solution. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <http://jdtechsolutions.net/wifi-best-practice-wifi-channels-allocation-and-configuration/>.
4. Geier E. How to configure Wi-Fi channels for top network performance [Електронний ресурс] / Eric Geier // Computerworld. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.wifisurveyors.com/configure-wi-fi-channels-network-pe>.
5. Кращій канал Wi-Fi: Який? [Електронний ресурс] // Кафедра ракетно-космічних та інноваційних технологій. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://dsit.education/blog/2023/krashchii-kanal-wi-fi/>.
6. Aranburu Altuna G. Effects of Propagation Environment for mmWave-network coverage and aggregate interface : Master’s Degree in Telecommunications Engineering / Aalto University. Helsinki, 2024. 72 с.
7. A Study on Propagation Models for 60 GHz Signals in Indoor Environments / Letícia Carneiro de Souza та ін. *Frontiers in Communications and Networks*. 2022. С. 4–5.
8. Харченко Н. А., Сокольников В. Д., Перевал А. А . *Проблеми Інформатизації* : Тези доповідей тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 27–28 листоп. 2025.
9. Deep reinforcement learning based interference optimization for coordinated beamforming in ultra-dense Wi-Fi networks / Jamshid Vacha та ін. *Computer Communications*. 2025. С. 1–5.

10. Zhengmao Ye. Exploring Impact of Doppler Effect on Time-Varying Multipath Wireless Communication Channels via Model Based Characteristic Analysis. *WSEAS Transactions on Signal Processing*. 2024. C. 1–2. Analysis.

11. Naveen Rai, Shubham Agarwal, Kottu Yeshwanth. Performance Analysis of Various Outdoor Propagation Path Loss Models for WiMax Wireless Network in Different Environments. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. C. 2–3.

12. An empirical study on the state-of-the-art methods for requirement-to-code traceability link recovery / Bangchao Wang та ін. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. 2024.