**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

## на тему: «Метод підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

(підпис) Катерина ПОРХУН
*(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Виконала: здобувачка вищої освіти
групи АРДМ-61
Катерина ПОРХУН

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО

Рецензент:

Київ – 2024

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**Навчально-науковий інститут телекомунікацій**

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
«  » _____ 2024 року

# ЗАВДАННЯ
# НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Порхун Катерині Анатоліївні

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль», керівник кваліфікаційної роботи Анатолій МАКАРЕНКО, д.т.н., професор, затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Wi-Fi-технології.
   2. Теорія розповсюдження радіохвиль
   3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Аналіз архітектури безпроводових технологій Wi-Fi;
   2. Стан проблеми поширення електромагнітних хвиль;
   3. Використання теорії розповсюдження радіохвиль для оптимізації роботи Wi-Fi мереж;

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1. | Підбір науково-технічної літератури | 26.10.24 | Викон. |
| 2. | Аналіз архітектури безпроводових технологій Wi-Fi | 29.10.24 | Викон. |
| 3. | Стан проблеми поширення електромагнітних хвиль | 01.12.24 | Викон. |
| 4. | Використання теорії розповсюдження радіохвиль для оптимізації роботи Wi-Fi мереж | 02.11.24 | Викон. |
| 5. | Висновки, вступ, реферат | 11.12.24 | Викон. |
| 6. | Розробка презентації | 25.12.24 | Викон. |

**Здобувачка вищої освіти** _____ Катерина ПОРХУН
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**Керівник кваліфікаційної роботи** _____ Анатолій МАКАРЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА**

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувачки вищої освіти Порхун Катерини Анатоліївни

на тему: «Метод підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль»

**Актуальність:**

Актуальність теми обумовлена необхідністю забезпечення стабільної та ефективної роботи Wi-Fi мереж в умовах зростаючого навантаження і складного радіочастотного середовища. Використання теорії розповсюдження радіохвиль дозволяє оптимізувати покриття, мінімізувати інтерференцію та підвищити якість безпроводового зв'язку, що є важливим для задоволення сучасних потреб користувачів.

**Позитивні сторони:**

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор, показала високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

**Недоліки:**

1. Більш детально розкрити математичні моделі розповсюдження радіохвиль, що застосовуються у проектуванні Wi-Fi систем, зокрема моделі Hata, Okumura або COST-231.

2. Уточнити специфіку роботи Multi-Link Operation (MLO) у сценаріях з високим трафіком, додавши приклади конкретних мережевих конфігурацій.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

**Висновок:** кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувачка Порхун Катерина Анатоліївна заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

**Рецензент:** _____ Оксана Варфоломєєва

*(науковий ступінь, вчене звання)* *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**Навчально-науковий інститут телекомунікацій**

# ПОДАННЯ
# ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
# ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
**на здобуття освітнього ступеня магістра**

Направляється здобувачка Порхун К.А. до захисту кваліфікаційної роботи
*(прізвище та ініціали)*

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Метод підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**Висновок керівника кваліфікаційної роботи**

Здобувачка Порхун Катерина Анатоліївна показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Порхун Катерини Анатоліївни на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Анатолій МАКАРЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

**Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу**

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувачка Порхун К.А.
*(прізвище та ініціали)*

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2024 року

# РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 77 стор., 14 рис., 10 табл., 38 дж.

*Мета роботи* – дослідження методів підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

*Об'єкт дослідження* – процес передачі даних у безпроводових Wi-Fi мережах.

*Предмет дослідження* – методи підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

*Короткий зміст роботи*: У першому розділі досліджено етапи розвитку стандартів Wi-Fi від IEEE 802.11 до сучасних Wi-Fi 6E та Wi-Fi 7, які демонструють значні вдосконалення в швидкості передачі даних, розширенні частотних діапазонів та впровадженні технологій MU-MIMO і OFDMA. Проаналізовано архітектуру Wi-Fi-мереж, включаючи точки доступу, маршрутизатори, клієнтські пристрої та системи безпеки, що впливають на стабільність і якість з'єднання. Показано перспективи впровадження Wi-Fi 7 завдяки інноваціям, як-от багатоканальний доступ (MLO) і модуляція 4096-QAM, які сприяють розвитку IoT і розумних міст.

У другому розділі розглянуто фізичні основи радіохвиль та їх вплив на Wi-Fi-мережі. Досліджено закони розповсюдження радіохвиль і вплив середовища (відкритого простору, міських і закритих приміщень) на якість зв'язку. Виявлено основні проблеми, зокрема затухання сигналу та інтерференцію, і надано рекомендації щодо оптимального розташування точок доступу й налаштування каналів для підвищення ефективності Wi-Fi-мереж.

У третьому розділі запропоновано методи покращення ефективності Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль, зокрема Multi-Link Operation (MLO), розширення каналів до 320 МГц, модуляції 4096-QAM і MU-MIMO. Проведено моделювання у NS-3, яке підтвердило ефективність цих методів, що забезпечують зменшення перешкод, покращення пропускної здатності та зниження затримок. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення Wi-Fi-мереж у різних середовищах.

*КЛЮЧОВІ СЛОВА:* IEEE 802.11, WI-FI 6E, WI-FI 7, MU-MIMO, OFDMA, MULTI-LINK OPERATION, МОДЕЛЮВАННЯ.

## ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 77 pages, 14 pictures, 10 table, 38 sources.

*The purpose of* the work is to study methods for improving the efficiency of Wi-Fi wireless technologies based on the theory of radio wave propagation.

*The object of* the study is the process of data transmission in wireless Wi-Fi networks.

*The subject of* the study is methods for improving the efficiency of Wi-Fi wireless technologies based on the theory of radio wave propagation.

*Summary of the work:* The first section examines the stages of development of Wi-Fi standards from IEEE 802.11 to modern Wi-Fi 6E and Wi-Fi 7, which demonstrate significant improvements in data transfer speed, expansion of frequency ranges and the introduction of MU-MIMO and OFDMA technologies. The architecture of Wi-Fi networks is analyzed, including access points, routers, client devices and security systems that affect the stability and quality of the connection. The prospects for the implementation of Wi-Fi 7 are shown thanks to innovations such as multi-channel access (MLO) and 4096-QAM modulation, which contribute to the development of IoT and smart cities.

The second section discusses the physical foundations of radio waves and their impact on Wi-Fi networks. The laws of radio wave propagation and the impact of the environment (open space, urban and indoor) on communication quality are studied. The main problems are identified, in particular, signal attenuation and interference, and recommendations are provided for the optimal location of access points and channel settings to improve the efficiency of Wi-Fi networks.

The third section proposes methods for improving Wi-Fi efficiency based on the theory of radio wave propagation, in particular, Multi-Link Operation (MLO), channel expansion to 320 MHz, 4096-QAM modulation and MU-MIMO. Simulations were conducted in NS-3, which confirmed the effectiveness of these methods, which provide interference reduction, improved throughput and reduced delays. The results of the study can be used to improve Wi-Fi networks in various environments.



*KEYWORDS:* IEEE 802.11, WI-FI 6E, WI-FI 7, MU-MIMO, OFDMA, MULTI-LINK OPERATION, SIMULATION.

**ЗМІСТ**

ВСТУП ..... 9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ WI-FI .. 11
1.1. Еволюція стандартів Wi-Fi: від IEEE 802.11 до сучасних технологій ..... 11
1.2. Архітектура та принципи функціонування Wi-Fi мереж ..... 20
1.3. Перспективи розвитку Wi-Fi технологій ..... 28
РОЗДІЛ 2. СТАН ПРОБЛЕМИ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ 35
2.1. Основи теорії розповсюдження радіохвиль ..... 35
2.2. Вплив середовища на розповсюдження радіохвиль ..... 42
2.3. Проблеми поширення сигналу у Wi-Fi мережах ..... 52
РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ WI-FI МЕРЕЖ ..... 63
3.1. Методи підвищення ефективності роботи перспективних безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль ..... 63
3.2. Оцінка ефективності результатів моделювання методів ..... 71
ВИСНОВКИ ..... 76
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ..... 78
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ..... 82

# ВСТУП

З розвитком безпроводових технологій зростають вимоги до якості та ефективності зв'язку, особливо в умовах зростання обсягів трафіку та кількості підключених пристроїв. Перспективні безпроводові технології, зокрема такі, як 5G, міліметрові хвилі та технології для інтернету речей (IoT), відкривають нові можливості для передачі великих обсягів даних з високою швидкістю. Проте для досягнення максимальної продуктивності цих технологій необхідно враховувати вплив факторів навколишнього середовища на розповсюдження радіохвиль.

Wi-Fi (Wireless Fidelity) є одним із найважливіших досягнень сучасних технологій, яке істотно вплинуло на всі аспекти життя суспільства. Ця технологія стала основою для швидкого та зручного доступу до інформації, що сприяє розвитку освіти, бізнесу, науки та розваг. Завдяки Wi-Fi з'явилися можливості для створення безпроводових інфраструктур, які забезпечують взаємодію людей, пристроїв та систем у реальному часі, незалежно від географічного розташування.

У сучасному світі Wi-Fi відіграє ключову роль у формуванні цифрового суспільства. Його вплив охоплює різні сфери, зокрема:

- Освіта: доступ до онлайн-ресурсів, дистанційне навчання та інтерактивні методики.
- Бізнес: оптимізація операцій, впровадження IoT-рішень та організація мобільних робочих середовищ.
- Охорона здоров'я: використання безпроводових технологій для моніторингу стану пацієнтів та дистанційних консультацій.
- Розумні міста: забезпечення комунікації між пристроями для управління транспортом, енергоспоживанням та безпекою.

Крім того, Wi-Fi сприяє соціальній інтеграції, дозволяючи людям залишатися на зв'язку з друзями, родиною та професійними спільнотами. Його доступність стала необхідною умовою для розвитку сучасного суспільства, де інформація та зв'язок є ключовими ресурсами. У зв'язку з цим дослідження ролі Wi-Fi у

суспільстві дозволяє глибше зрозуміти його значення, виклики та перспективи подальшого розвитку.

Теорія розповсюдження радіохвиль є основою для аналізу й моделювання поведінки сигналів у різних середовищах. Вивчення таких аспектів, як відбиття, дифракція, поглинання та інтерференція, дозволяє розробляти нові підходи до оптимізації передачі сигналу й покращення якості зв'язку. Це має вирішальне значення для безпроводових технологій, що використовують високочастотні діапазони, де вплив перешкод є особливо помітним.

Метою цієї роботи є дослідження ефективності роботи перспективних безпроводових технологій на основі теорії розповсюдження радіохвиль. У рамках дослідження будуть проаналізовані існуючі моделі розповсюдження радіохвиль, розглянуто їх застосування в умовах сучасних і майбутніх безпроводових технологій, а також запропоновано нові підходи до підвищення ефективності передачі даних у різних середовищах.

**Мета роботи** – дослідження методів підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

**Об'єкт дослідження** – процес передачі даних у безпроводових Wi-Fi мережах.

**Предмет дослідження** – методи підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ БЕЗПРОВОДОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ WI-FI

## 1.1. Еволюція стандартів Wi-Fi: від IEEE 802.11 до сучасних технологій

Wi-Fi, скорочення від Wireless Fidelity, — це технологія, яка забезпечує можливості бездротового зв'язку для різних пристроїв, забезпечуючи підключення без потреби у фізичних кабелях [1]. Основні функції Wi-Fi зосереджені навколо його здатності бездротової передачі даних на короткі відстані, головним чином працюючи в частотних діапазонах 2,4 ГГц і 5 ГГц [2]. Ця технологія дозволяє користувачам безперебійно підключати кілька пристроїв, таких як смартфони, ноутбуки та розумну побутову техніку, до Інтернету або локальних мереж (табл. 1.1). Еволюція стандартів Wi-Fi, зокрема сімейства IEEE 802.11, зіграла вирішальну роль у підвищенні швидкості, радіусу дії та надійності бездротових з'єднань, зробивши їх невід'ємною частиною сучасного життя [3].

Роль Wi-Fi у підключенні пристроїв надзвичайно зросла, особливо в середовищах, де дротові з'єднання є непрактичними або неможливими [4]. Будучи основним елементом будинків, офісів і громадських місць, Wi-Fi надає користувачам гнучкість доступу до Інтернету та спілкування з іншими пристроями без прив'язки до кабелів. Запровадження різних стандартів, таких як IEEE 802.11n та IEEE 802.11ac, покращило якість бездротових з'єднань, пропонуючи збільшену пропускну здатність і високу швидкість передачі даних [5]. Це дозволило здійснювати різні види діяльності, починаючи від трансляції відео високої чіткості й закінчуючи онлайн-іграми, покращуючи таким чином загальний досвід користувача та роблячи Wi-Fi критичним компонентом сучасних технологій.

Стандарти є життєво важливими для забезпечення сумісності між різними пристроями, які використовують технологію Wi-Fi [6]. Стандарти IEEE 802.11 встановлюють вказівки, яких повинні дотримуватися виробники, що сприяє безперебійному зв'язку між пристроями різних марок і поколінь. Наприклад, зворотна сумісність стандарту 802.11ac із попередніми стандартами, такими як

802.11b/g/n, дозволяє користувачам без проблем підключати старі пристрої до новіших мереж [5]. Ця сумісність має важливе значення для підтримки безперебійної роботи користувача та забезпечення того, що користувачі можуть оновлювати своє обладнання без необхідності заміни всіх своїх пристроїв, таким чином сприяючи більш стійкому підходу до впровадження технологій [4].

Таблиця 1.1.

Порівняння показників поколінь Wi-Fi

| | WiFi 5 | WiFi 6 | WiFi 6E | WiFi 7 |
|---|---|---|---|---|
| Дата запуску | 2013 | 2019 | 2021 | 2024 |
| IEEE стандарт | 802.11ac | 802.11ax | 802.11ax | 802.11be |
| Максимальна швидкість | 3.5 Гбіт/с | 9.6 Гбіт/с | 9.6 Гбіт/с | 46 Гбіт/с |
| Частота | 5 ГГц | 2.4 ГГц, 5 ГГц | 2.4 ГГц, 5 ГГц 6 ГГц | 2.4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц |
| Ширина каналу | 20, 40, 80, 80+80, 160 МГц | 20, 40, 80, 80+80, 160 МГц | 20, 40, 80, 80+80, 160 МГц | До 320 МГц |
| Модуляція | 256-QAM OFDM | 1024-QAM OFDMA | 1024-QAM sOFDMA | 4096-QAM OFDMA (with extensions) |
| MIMO | 4×4 MIMO DL MIMO | 8×8 UL/DL MU-MIMO | 8×8 UL/DL MU-MIMO | 16×16 UL/DL MU-MIMO |

Початкова розробка стандарту IEEE 802.11 стала важливою віхою в еволюції бездротових локальних мереж (WLAN) [2]. Заснований на початку 1990-х років цей стандарт був розроблений для полегшення бездротового зв'язку в діапазоні частот 2,4 ГГц [7]. Метою було створити надійний спосіб передачі даних, який дозволив би користувачам підключати пристрої без обмежень фізичних кабелів. У результаті стандарт сприяв інноваціям у мережевих технологіях, які зрештою

революціонізували спосіб доступу компаній і окремих осіб до інформації та спілкування [5]. Ця фундаментальна технологія заклала основу для наступних удосконалень і ітерацій у рамках стандартів Wi-Fi.

Основні особливості оригінальної специфікації 802.11 включали максимальну швидкість передачі даних 2 Мбіт/с і підтримку різних методів модуляції, таких як стрибкоподібний розширений спектр (FHSS) і розширений спектр прямої послідовності (DSSS) [10]. Ці функції були ключовими для забезпечення рівня надійності та продуктивності, який відповідав додаткам того часу. Однак незабаром стали очевидними обмеження оригінальної специфікації, оскільки почали зростати вимоги користувачів до більшої швидкості та надійніших з'єднань. У відповідь на це стандарти розвивалися, що призвело до покращень, спрямованих на покращення підключення, безпеки та загального досвіду користувача [14].

Ранні застосування технології 802.11 підкреслили як її потенціал, так і її обмеження [T9]. Спочатку стандарт використовувався переважно в бізнес-середовищах, де він забезпечував зручне рішення для підключення до мережі. Однак такі фактори, як обмежений радіус дії, перешкоди від інших пристроїв і низька швидкість передачі даних, обмежили його ефективність у широких споживчих програмах [12]. Незважаючи на ці проблеми, ця технологія заклала основу для майбутніх досягнень, що зрештою призвело до розробки швидших і ефективніших стандартів, таких як 802.11a, b і g [11]. У цих наступних ітераціях було усунено багато обмежень вихідного стандарту, проклавши шлях для повсюдного бездротового зв'язку, на який ми покладаємось сьогодні (рис. 1.1).

Запровадження стандарту IEEE 802.11b у 1999 році ознаменувало важливу віху в еволюції технологій Wi-Fi, забезпечивши покращену швидкість і стабільніші з'єднання порівняно з його попередниками [7]. Працюючи в діапазоні частот 2,4 ГГц, 802.11b запропонував максимальну швидкість передачі даних 11 Мбіт/с, що було суттєвим покращенням для бездротових мереж на той час [7]. Це збільшення швидкості не тільки сприяло більш плавному перегляду Інтернету та передачі файлів, але й розширило ефективний діапазон бездротових з'єднань. У результаті

802.11b став комерційно успішним і заклав основу для майбутніх удосконалень у стандартах Wi-Fi, фактично встановивши стандарт для галузі.

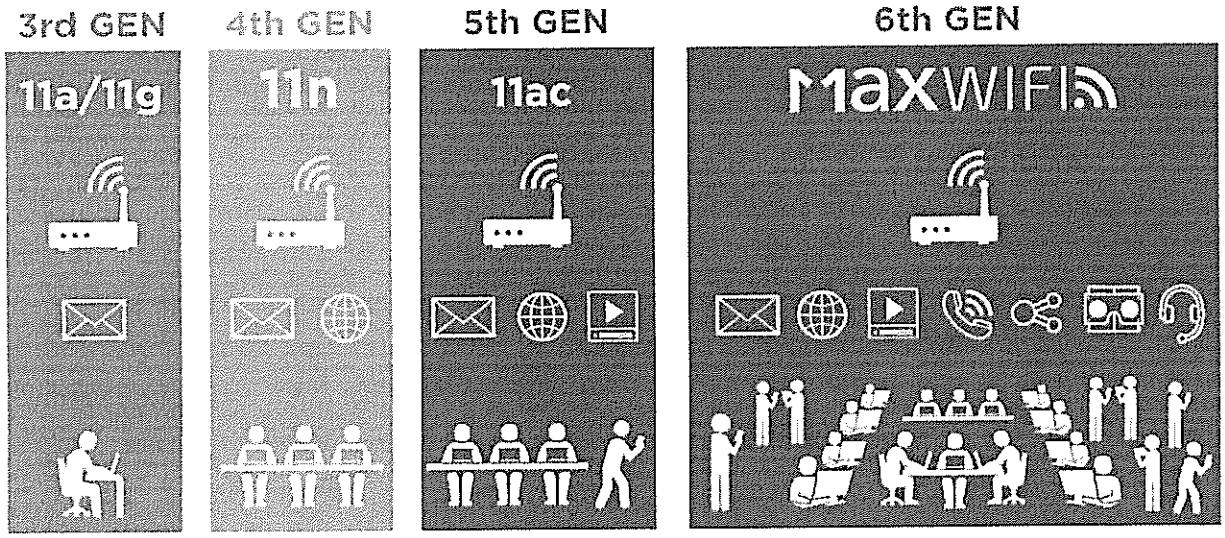



Рис. 1.1. Еволюція технології Wi-Fi

Спираючись на основу, закладену 802.11b, перехід на стандарт IEEE 802.11g призвів до значного підвищення продуктивності [1]. Використовуючи більш ефективні технології модуляції сигналу, 802.11g підвищив максимальну швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с, зберігаючи при цьому зворотну сумісність із пристроями 802.11b [1]. Це покращення дозволило користувачам відчути високу швидкість завантаження та кращу загальну продуктивність мережі, особливо в середовищах із кількома підключеними пристроями. Стандарт 802.11g не тільки покращив швидкість бездротового зв'язку, але й сприяв зростанню впровадження технології Wi-Fi як у побутовій електроніці, так і в корпоративних рішеннях.

Порівнюючи стандарти IEEE 802.11b і 802.11g з їхніми попередниками, прогрес очевидний [6]. Попередній стандарт 802.11a, який працював у діапазоні частот 5 ГГц, забезпечував максимальну швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с; однак його обмежений діапазон зробив його менш сприятливим для широкого впровадження [8]. Навпаки, як 802.11b, так і 802.11g представили більш привабливе рішення для користувачів, яким потрібні надійні з'єднання на великих відстанях. Поєднання покращеної швидкості, радіусу дії та сумісності зі старими пристроями

зробило 802.11b і 802.11g вирішальними досягненнями в ландшафті Wi-Fi, заклавши основу для майбутніх інновацій у бездротових технологіях.

IEEE 802.11n представляє значний прогрес у мережевих технологіях Wi-Fi, офіційно схвалений 11 вересня 2009 року [9]. Цей стандарт вводить ключові вдосконалення, які покращують загальну продуктивність бездротових з'єднань, включаючи збільшення швидкості передачі даних і кращий радіус дії. Одним із найпомітніших покращень є використання ширших каналів; у той час як попередні стандарти працювали на каналах 20 МГц, 802.11n допускає канали 40 МГц, що фактично подвоює швидкість передачі даних. Крім того, 802.11n підтримує схеми більш високої модуляції, які додатково оптимізують передачу даних. Завдяки цим удосконаленням максимальна теоретична швидкість може досягати 600 Мбіт/с, що робить 802.11n життєво важливим кроком до швидшого та надійнішого бездротового зв'язку [6].

Наріжним каменем стандарту 802.11n є впровадження технології MIMO (Multiple Input Multiple Output), яка революціонізує бездротовий зв'язок завдяки використанню кількох антен як на стороні передавача, так і на приймачі [10]. Ця технологія дозволяє одночасно передавати кілька потоків даних, значно підвищуючи швидкість каналу в порівнянні з попередніми стандартами. MIMO покращує якість і надійність сигналу, зменшуючи перешкоди та забезпечуючи краще використання доступної смуги пропускання [8]. Крім того, MIMO підтримує розширені функції, такі як MU-MIMO (багатокористувацька MIMO), яка дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати один канал, що ще більше підвищує ефективність бездротових мереж [5]. Цей технологічний стрибок зіграв вирішальну роль у задоволенні зростаючого попиту на високошвидкісний доступ до Інтернету в різних середовищах.

Практичні застосування та переваги 802.11n очевидні в багатьох налаштуваннях, починаючи від домашніх мереж і закінчуючи корпоративними рішеннями [6]. Багато сучасних пристроїв, включаючи смартфони, ноутбуки та гаджети для розумного дому, використовують цей стандарт для забезпечення безперебійного підключення та високошвидкісного доступу до Інтернету.

Користувачі отримують переваги від покращеної якості потокового передавання для відеосервісів, швидшого завантаження та більш надійного з'єднання в середовищах з кількома користувачами. У завантажених домогосподарствах або на робочих місцях здатність 802.11n підтримувати стабільне з'єднання, незважаючи на численні пристрої, що працюють одночасно, є особливо вигідною. У результаті як організації, так і окремі особи відчувають підвищення продуктивності та задоволення завдяки застосуванню технології 802.11n [11].

Перехід на стандарт 802.11ac, також відомий як Wi-Fi 5, приніс значні вдосконалення, які трансформували бездротове підключення [12]. Однією з основних функцій 802.11ac є його здатність працювати в діапазоні частот 5 ГГц, що забезпечує більш високу швидкість передачі даних і зменшує перешкоди порівняно з переповненим діапазоном 2,4 ГГц, який використовувався попередніми стандартами [12] (рис. 1.2). Ця зміна не тільки покращує загальну ефективність мережі, але й забезпечує швидкість передачі даних до 3,5 Гбіт/с, що є значним кроком у порівнянні з попередніми стандартами [12]. Крім того, впровадження таких технологій, як Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO), дозволяє кільком пристроям обмінюватися даними одночасно, додатково оптимізуючи використання пропускної здатності та покращуючи роботу користувачів у середовищах із великою кількістю підключених пристроїв.

Неможливо недооцінити важливість формування променя та ширших каналів у 802.11ac, оскільки ці функції відіграють вирішальну роль у максимізації потужності та якості сигналу [12]. Технологія формування променя дозволяє маршрутизаторам фокусувати сигнал Wi-Fi безпосередньо на підключені пристрої, а не транслювати його рівномірно в усіх напрямках. Цей цілеспрямований підхід значно покращує надійність і дальність з'єднання Wi-Fi [5]. Крім того, 802.11ac використовує ширші канали, зокрема 80 МГц і 160 МГц, що дозволяє збільшити пропускну здатність даних. Ця комбінація формування променя та ширших каналів забезпечує більш надійну та ефективну бездротову мережу, особливо в будинках і офісах, де кілька пристроїв конкурують за пропускну здатність.

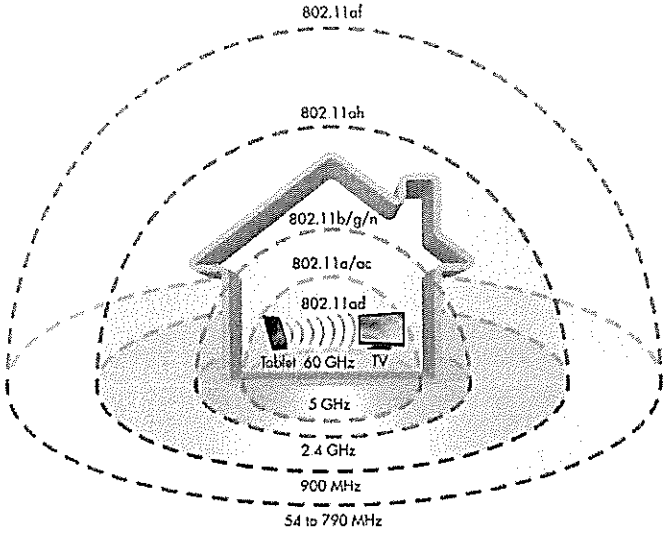



Рис. 1.2. Радіус покриття технології Wi-Fi в залежності від стандарту

Удосконалення, принесені 802.11ac, мали глибокі наслідки для потокової передачі та доставки контенту високої чіткості [12]. Оскільки споживачі все більше потребують високоякісного потокового відео та онлайн-ігор, вищі швидкості передачі даних і покращена цілісність сигналу 802.11ac сприяють безперебійному відтворенню вмісту 4K і навіть 8K. Цей стандарт задовольняє зростаючу потребу в безперервному споживанні медіа високої чіткості, забезпечуючи користувачам мінімальну буферизацію та високу якість передачі [12]. Можливість одночасної підтримки кількох додатків із високою пропускною здатністю робить 802.11ac необхідною технологією для сучасних домогосподарств і підприємств, де потокове передавання, відеоконференції та онлайн-ігри стали невід'ємною частиною повсякденного життя.

Стандарт IEEE 802.11ax, широко відомий як Wi-Fi 6, представляє значну еволюцію в технології бездротового зв'язку, зосереджуючись насамперед на ефективності та покращенні продуктивності [12]. На відміну від своїх попередників, Wi-Fi 6 розроблено для задоволення зростаючого попиту на підключення в сучасних середовищах з високою щільністю, таких як офіси, стадіони та міські райони [13]. У цьому новому стандарті використовуються передові технології для оптимізації використання доступної смуги пропускання, що дозволяє одночасно підключати більше пристроїв без погіршення загальної

продуктивності мережі. Підвищуючи спектральну ефективність, Wi-Fi 6 може забезпечувати швидші та надійніші з'єднання, що змінює правила гри у сфері бездротових мереж.

Ключовою особливістю 802.11ax є впровадження множинного доступу з ортогональним частотним поділом (OFDMA), який значно підвищує ефективність передачі даних [14]. Ця технологія розбиває канали на менші підканали, що дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати один канал. У результаті мережа може динамічно розподіляти пропускну здатність на основі попиту, тим самим зменшуючи затримку та збільшуючи загальну пропускну здатність. Це вдосконалення не тільки покращує роботу користувача, але й ефективніше використовує доступний спектр, що робить його особливо корисним у багатолюдних середовищах, де численні пристрої змагаються за обмежені ресурси.

Переваги Wi-Fi 6 виходять за межі швидкості та ефективності, особливо в густонаселених середовищах, де підключено кілька пристроїв [12]. У таких сценаріях, як стадіони або зайняті офіси, здатність підтримувати більшу кількість одночасних з'єднань без шкоди для продуктивності є надзвичайно важливою. Wi-Fi 6 досягає цього за допомогою таких технологій, як Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO), яка дозволяє кільком користувачам одночасно отримувати потоки даних [5]. Ця можливість гарантує, що всі пристрої, від смартфонів до пристроїв Інтернету речей, можуть підтримувати міцне з'єднання навіть у ситуаціях із високим трафіком. Як наслідок, користувачі відчувають менше перешкод і покращують зв'язок, що свідчить про значний прогрес у бездротових технологіях.

Wi-Fi 6E представляє значний прогрес у бездротових технологіях, розширюючи можливості Wi-Fi 6 шляхом розблокування додаткового спектру в діапазоні 6 ГГц [15]. Це розширення дозволяє отримати більше каналів, що означає збільшення пропускної здатності та зменшення заторів, особливо в густонаселених районах, де багато пристроїв конкурують за підключення. Представлення Wi-Fi 6E підтримує більш широкий спектр програм і пристроїв, забезпечуючи кращу

продуктивність у таких середовищах, як офіси, школи та розумні будинки. Завдяки здатності обробляти більшу кількість одночасних з'єднань, Wi-Fi 6E покращує взаємодію з користувачем, забезпечуючи більш високу швидкість і підвищену надійність, що є вирішальним для таких дій, як потокове передавання вмісту високої чіткості та участь в онлайн-іграх.

Заглядаючи вперед, потенційні вдосконалення та майбутні стандарти, такі як Wi-Fi 7, вже на горизонті, обіцяють ще більші вдосконалення бездротових технологій [12]. Wi-Fi 7 має на меті ґрунтуватися на фундаменті, закладеному Wi-Fi 6 і 6E, шляхом підвищення швидкості передачі даних, підвищення ефективності та зменшення затримки. Очікується, що цей новий стандарт підтримуватиме розширені функції, такі як багатоканальна робота, яка дозволяє пристроям підключатися до кількох каналів одночасно, тим самим максимізуючи пропускну здатність і мінімізуючи перешкоди. Еволюція від Wi-Fi 6E до Wi-Fi 7 може призвести до кардинальних змін у взаємодії користувачів із цифровим контентом і пристроями, прокладаючи шлях для додатків, які вимагають наднадійного зв'язку з низькою затримкою, необхідного для таких секторів, як віртуальна реальність і доповнена мережа.

Прогрес у технології Wi-Fi, особливо з появою Wi-Fi 6E та майбутніх стандартів, має глибокі наслідки для Інтернету речей (IoT) та розумних пристроїв [16]. Оскільки ці технології розвиваються, вони забезпечують більш плавну інтеграцію пристроїв IoT у повсякденне життя, підвищуючи функціональність і надійність розумних будинків, підключених пристроїв і промислових додатків IoT. Збільшена пропускна здатність і зменшена затримка, які забезпечує Wi-Fi 6E, сприяють спілкуванню між пристроями в режимі реального часу, забезпечуючи більш ефективний обмін даними та розумнішу автоматизацію. Цей перехід знаменує собою значний перехід від традиційного «Інтернету людей» до «Інтернету речей», де взаємопов'язані пристрої можуть спілкуватися та працювати незалежно, що призводить до інноваційних програм і покращення взаємодії з користувачами в різних секторах.

## 1.2. Архітектура та принципи функціонування Wi-Fi мереж

Основні елементи архітектури Wi-Fi мереж (табл. 1.2)

Маршрутизатор Wi-Fi — це пристрій, призначений для забезпечення безпроводового доступу до мережі Інтернет або локальної мережі (LAN) для підключених пристроїв. Він виконує функції маршрутизації даних між пристроями в мережі та зовнішніми сервісами, використовуючи безпроводове з'єднання на основі стандартів IEEE 802.11. Основними завданнями Wi-Fi маршрутизатора є:

1. Забезпечення доступу до Інтернету — прийом і передача даних між локальними пристроями та глобальною мережею.

2. Маршрутизація трафіку — розподіл даних між підключеними пристроями за принципом найефективнішого маршруту.

3. Забезпечення безпеки — захист мережі від несанкціонованого доступу за допомогою шифрування та аутентифікації.

4. Розширення мережевих можливостей — підключення кількох пристроїв одночасно та забезпечення стабільного з'єднання.

5. Оптимізація трафіку — управління пропускною здатністю та пріоритизація передачі даних для забезпечення якості обслуговування (QoS).

Точки доступу (Access Points) є центральними пристроями безпровідної мережі, які забезпечують з'єднання між безпровідними клієнтами та проводовими мережами [1]. Основна функція точки доступу відбувається в наданні бездротового з'єднання; вона не призначена для обробки та контролю трафіку, що означає, що точки доступу не мають функцій брендмауера [2]. Ці пристрої також забезпечують доступ до Інтернету в різних ситуаціях, таких як подорожі або робота поза офісом [3]. Важливо відзначити, що точки доступу контролюють окремі зони, що дозволяють їм обслуговувати декілька клієнтів одночасно, створюючи ефективну бездротову мережу [4].

Клієнтські пристрої, такі як ноутбуки, смартфони та інші безпровідні гаджети, є невід'ємною частиною мережі Wi-Fi [5]. Ці пристрої мають різноманітні характеристики, які дозволяють їх здатність взаємодіяти з точками доступу.

Таблиця 1.2.

Елемент архітектури Wi-Fi мереж

| Елемент архітектури | Опис |
|---|---|
| Клієнтські пристрої | Пристрої, які підключаються до Wi-Fi-мережі (смартфони, IoT, ноутбуки). |
| Точки доступу (APs) | Центральні вузли для передачі даних між клієнтами і мережею. |
| Контролери безпроводових мереж (WLCs) | Централізоване управління точками доступу у великих мережах. |
| Проводова інфраструктура | Комутатори, маршрутизатори та PoE для підключення точок доступу. |
| Керуючі системи | Моніторинг і аналіз роботи мережі за допомогою ПЗ. |
| Безпека Wi-Fi мереж | Шифрування, аутентифікація, сегментація для захисту мережі. |
| Хмарні рішення | Інтеграція з хмарними платформами для управління та аналізу. |

Наприклад, вони можуть підключатися до мережі через різні бездротові протоколи, такі як Wi-Fi, Bluetooth та GPRS [5]. Взаємодія між клієнтськими пристроями та точками доступу відбувається через спеціальні канали зв'язку, що забезпечують передачу даних з високою швидкістю. Ці фактори грають важливу роль у формуванні загальної продуктивності бездротової мережі та її здатності обслуговувати велику кількість користувачів.

Контролери безпроводових мереж (Wireless Controllers) є спеціалізованими компонентами комп'ютерних мереж, призначеними для моніторингу, управління та оптимізації роботи бездротового доступу [6]. Вони не тільки підтримують традиційні функції WLAN, але й часто включають вбудовані брандмауери, що роблять безпеку мережі [7]. Контролери забезпечують централізоване управління мережею, що дозволяє адміністраторам шукати параметри бездротового зв'язку,

контролювати завантаження та забезпечувати якісне обслуговування клієнтів. Застосування контролерів безпровідних мереж дозволяє створити стабільні та надійні мережі Wi-Fi, здатні відповідати вимогам сучасних користувачів.

Технологія радіодоступу в Wi-Fi

Фізичний рівень (PHY) технології Wi-Fi має вирішальне значення для розуміння того, як працює бездротовий зв'язок [8]. Цей рівень визначає характеристики радіосигналів, включаючи методи модуляції, швидкість передачі даних і загальну структуру переданого сигналу [9]. Наприклад, стандарти IEEE 802.11 представили різні типи PHY, кожен з яких призначений для підвищення продуктивності в певних середовищах. Ці стандарти забезпечують зворотну сумісність із попередніми версіями, такими як 802.11b і 802.11g, а також забезпечують покращену швидкість передачі даних, порівнянну з Fast Ethernet [9]. Аналізуючи ці принципи, ми можемо оцінити складність, пов'язану з бездротовою передачею сигналу, зокрема те, як різні PHY можуть впливати на покриття та надійність.

На канальному рівні методи керування доступом до середовища (MAC) відіграють важливу роль в управлінні тим, як пристрої отримують доступ до спільних радіохвиль для передачі даних [8]. Рівень MAC відповідає за координацію передачі пакетів даних від кількох пристроїв, щоб запобігти зіткненням і забезпечити ефективний зв'язок. Відповідно до специфікації IEEE 802 рівень MAC поділяється на два підрівні: підрівень MAC, який керує доступом до фізичного середовища, і рівень керування логічним з'єднанням (LLC), який надає послуги верхнім рівням [5]. Організація цих рівнів має важливе значення для підтримки надійної та ефективної роботи в бездротових мережах, оскільки вони визначають, як дані упаковуються, адресуються та надсилаються через мережу [4].

Частотний діапазон і характеристики каналів мереж Wi-Fi є критичними факторами, що впливають на їх продуктивність і зручність використання [8]. Більшість мереж Wi-Fi працюють у неліцензійних діапазонах частот 2,4 ГГц і 5 ГГц, кожна з яких має певні переваги та обмеження. Наприклад, Wi-Fi, що працює на частоті 2,4 ГГц, зазвичай пропонує більший радіус дії, але більш чутливий до

перешкод від інших електронних пристроїв [4]. На відміну від цього, діапазон 5 ГГц підтримує вищі швидкості передачі даних і надає більше каналів, що може зменшити потенційну перевантаження [10]. Розуміння цих частотних характеристик дозволяє розробникам мережі оптимізувати покриття та продуктивність на основі конкретних потреб середовища, забезпечуючи надійне підключення для користувачів у різних програмах.

Режими роботи Wi-Fi мереж

Режим інфраструктури, або Infrastructure Mode, є найбільш розширеним способом організації мережі Wi-Fi [11] (табл. 1.3). У цьому режимі точки доступу підключені до однієї через кабельні мережі або бездротові мости, що забезпечує надійне з'єднання між різними пристроями в мережі [12]. Основним призначенням цього режиму є можливість підключення багатьох користувачів до Інтернету через один або кілька точок доступу, що створює централізовану архітектуру мережі. Цей підхід дозволяє користувачам легко підключатися до мережі, а також забезпечує високу швидкість передачі даних, останні точки доступу можуть обслуговувати декілька пристроїв одночасно.

Режим Ad-hoc, або точка-точка, використовується для створення тимчасових мереж без необхідності в точках доступу або маршрутизаторах [13] (рис. 1.3). Цей режим дозволяє пристроям взаємодіяти один з одним, формуючи самостійні мережі, які особливо корисні в ситуаціях, коли потрібно швидко з'єднати два комп'ютери для обміну даними [8]. Наприклад, за умови відсутності доступу до традиційної мережі, цей режим може бути застосований для швидкого та ефективного підключення. До того ж Ad-hoc мережі є динамічними та самонастроюючими, що робить їх ідеальними для використання в польових умовах або під час екстрених ситуацій [14].

Режим Mesh є інноваційним підходом до побудови бездротових мереж, що забезпечує високу доступність і легкість в управлінні [15]. У Mesh мережах кожен вузол працює незалежно від інших, що дозволяє зменшити ймовірність виникнення «вузьких місць» при передачі даних [16].

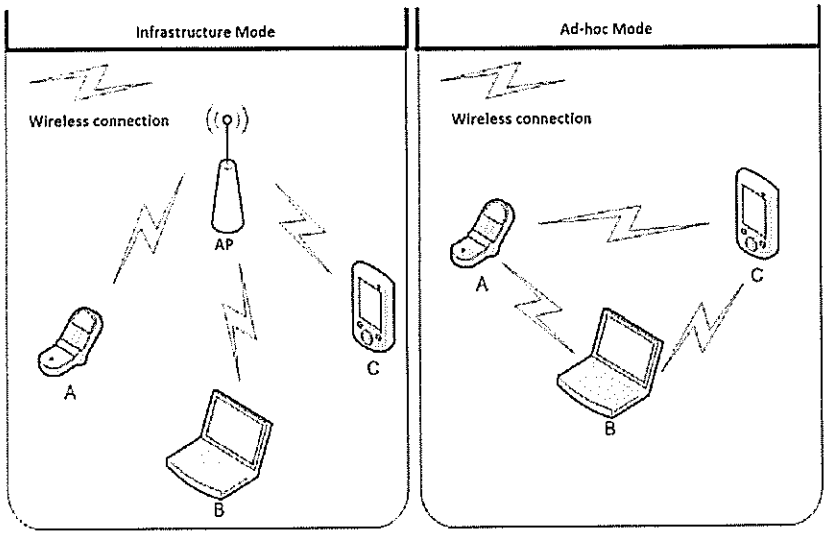



Рис. 1.3. Режими роботи Wi-Fi мереж

Цей тип мережі складається з багатьох пристроїв, які спільно створюють єдину безшовну мережу, забезпечуючи стабільне з'єднання на великій площі [17]. Завдяки своїй системі Mesh Wi-Fi можна автоматично перенаправляти трафік, що покращує загальну продуктивність мережі та забезпечує безперебійний доступ до Інтернету для всіх користувачів [18].

Механізми забезпечення якості обслуговування (QoS)

Пріоритезація передачі даних є ключовим аспектом якості обслуговування (QoS) у мережах Wi-Fi, головним чином сприяючим технологією Wireless Multimedia Extensions (WMM) [8]. WMM дозволяє класифікувати різні типи трафіку даних за чотирма категоріями доступу: голос, відео, найкращі зусилля та фон. Призначаючи вищий пріоритет додаткам реального часу, таким як голос і відео, WMM гарантує, що ці чутливі до часу пакети даних передаються більш ефективно, зменшуючи затримку та покращуючи загальну взаємодію з користувачем. Цей пріоритет є важливим, особливо в середовищах, де кілька програм змагаються за пропускну здатність. Можливість ефективного керування цими пріоритетами означає, що користувачі можуть відчувати більш плавну потокову передачу та чіткіші виклики, що підкреслює важливість механізмів QoS у сучасних бездротових мережах.

Таблиця 1.3.

Режими роботи Wi-Fi мереж

| Режими роботи | Опис | Приклади використання |
|---|---|---|
| Інфраструктурний режим | Використання точки доступу як центрального вузла для з'єднання клієнтських пристроїв. | Офіси, громадські простори, освітні заклади. |
| Ad-Hoc режим | Пряме з'єднання між клієнтськими пристроями без точки доступу. | Тимчасові або невеликі локальні мережі. |
| Mesh-мережі | Самовідновлювана мережа, що складається з декількох точок доступу. | Великі будівлі, інтелектуальні міста. |
| Wi-Fi Direct | Пряма передача даних між пристроями без точки доступу. | Друк із мобільних пристроїв, передача мультимедіа. |
| Hotspot (режим точки доступу) | Пристрій забезпечує доступ інших пристроїв до мережі як точка доступу. | Забезпечення доступу до Інтернету в дорозі. |
| Режим повторювача (Wi-Fi Extender) | Ретрансляція сигналу для збільшення зони покриття мережі. | Великі будівлі, складні архітектурні середовища. |
| Wi-Fi Tethering | Обмін Інтернетом через мобільний пристрій за допомогою Wi-Fi. | Подорожі, відсутність традиційного доступу до Інтернету. |
| Режим мосту (Bridge Mode) | З'єднання між двома сегментами мережі для інтеграції інфраструктур. | Об'єднання проводової та безпроводової інфраструктури. |

Ефективне керування затримками та пропускною здатністю є ще одним важливим компонентом QoS у мережах Wi-Fi [4]. Такі методи, як формування трафіку та розподіл пропускної здатності, дозволяють адміністраторам мережі контролювати потоки даних і мінімізувати затримку. Ці методи можуть динамічно регулювати пропускну здатність, надану різним програмам, на основі поточних умов мережі та вимог користувачів. Наприклад, під час пікового використання мережа може виділяти більше ресурсів для програм з високим пріоритетом, одночасно регулюючи менш критичний трафік. Цей проактивний підхід до керування затримками та пропускною здатністю гарантує, що користувачі отримають постійну продуктивність, навіть коли мережа перебуває під великим навантаженням. Такі стратегії управління необхідні для підтримки надійності та ефективності послуг Wi-Fi.

Динамічний розподіл ресурсів є фундаментальним принципом забезпечення QoS в мережах Wi-Fi [15]. Цей підхід передбачає безперервний моніторинг стану мережі та вимог користувачів для ефективного розподілу ресурсів. Наприклад, якщо в певній області в мережі спостерігається збільшення користувачів, система може автоматично перерозподілити пропускну здатність відповідно до додаткового попиту, гарантуючи, що всі користувачі отримають належне обслуговування. Ця гнучкість не тільки підвищує задоволеність користувачів, але й оптимізує продуктивність мережі. Інтегруючи динамічний розподіл ресурсів у проект мережі Wi-Fi, провайдери можуть створювати більш стійкі та адаптовані мережі, здатні задовольняти різноманітні потреби різноманітних програм і сценаріїв користувачів.

Безпека Wi-Fi мереж

Основні стандарти шифрування мережі Wi-Fi є критичними для забезпечення їх безпеки. Найбільш відомими протоколами є WEP, WPA, WPA2 та WPA3 [19]. WEP, який був першим стандартом шифрування, вже не підтримується через численні вразливості, які можуть зловмисникам отримати доступ до мережі [8]. WPA і його вдосконалена версія WPA2 значно підвищили рівень захисту, запровадивши більш надійні алгоритми шифрування. Сьогодні WPA3 є

найсучаснішим протоколом шифрування, проте не всі бездротові точки доступу підтримують його [20]. Ці стандарти шифрування не можуть зменшити ймовірність несанкціонованого доступу до мережі, що є масовим аспектом забезпечення безпеки Wi-Fi з'єднання.

Аутентифікація користувачів та управління доступом є ще одним аспектом безпеки Wi-Fi мережі. Процеси аутентифікації за допомогою перевірки особи, яка намагається підключитися до мережі, і може включати використання паролів, сертифікатів або двофакторної аутентифікації [21]. Ці методи захисту допомагають запобігти несанкціонованому доступу до мережі, забезпечуючи можливість контролювати, хто може підключатися до ресурсів. Наприклад, протокол WPA2-Enterprise пропонує розширені можливості для аутентифікації користувачів, що робить його ідеальним вибором для організацій, які потребують високого рівня безпеки [22]. Ефективна система управління доступом є важливою для підтримки цілісності мережі та захисту чутливих даних.

Захист від атак, таких як підслуховування та відмова в обслуговуванні (DoS), є необхідним для підтримки безпеки мережі Wi-Fi [23]. Підслуховування може статися, коли зловмисники використовують різні методи для перехоплення даних, які передаються через бездротову мережу [24]. Це може призвести до компрометації конфіденційної інформації, тому важливо використовувати шифрування для захисту даних. Відмова в обслуговуванні (DoS) – це, що спрямоване на вас, щоб зробити мережеву атаку недоступною для легітимних користувачів [25]. Захист від цих атак передбачає впровадження засобів моніторингу мережі, а також використання технологій, які дозволяють ідентифікувати та блокувати негативні дії, що забезпечують підвищений рівень безпеки для користувачів мережі Wi-Fi.

## 1.3. Перспективи розвитку Wi-Fi технологій

Wi-Fi 7, також відомий як 802.11be, представляє кілька ключових інновацій, які значно покращують бездротове з'єднання [1]. Цей новий стандарт розроблено для забезпечення максимальної швидкості передачі даних до 46 Гбіт/с, що є вражаючим кроком у порівнянні з можливостями Wi-Fi 6, який забезпечує максимальну швидкість 9,6 Гбіт/с [2]. Одним із найпомітніших досягнень у Wi-Fi 7 є його здатність використовувати три діапазони частот — 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц — що забезпечує більшу гнучкість і покращує загальну продуктивність [3]. Крім того, Wi-Fi 7 підтримує канали шириною 320 МГц і може обробляти до 16 просторових потоків MU-MIMO, таким чином дозволяючи кільком пристроям підключатися одночасно без шкоди для швидкості чи ефективності [4]. Ці інновації демонструють прагнення Wi-Fi 7 задовольнити зростаючі вимоги до вищої пропускної здатності та меншої затримки в сучасному бездротовому зв'язку (табл. 1.4).

Таблиця 1.4.

Ключові інновації Wi-Fi 7

| Параметр | Ключові нововведення |
|---|---|
| Перспективи розвитку Wi-Fi технологій | Ключові інновації Wi-Fi 7, порівняння з попередніми стандартами, вплив на індустрію. |
| Технології багатоканального доступу (MLO) | Принцип роботи MLO, переваги (пропускна здатність, надійність), виклики впровадження. |
| Розширення спектральної ефективності в Wi-Fi 7 | Модуляція 4096-QAM, ширина каналу 320 МГц, управління частотним спектром. |
| Інтеграція технологій для інтелектуальних мереж | Технології OFDMA та MU-MIMO, інтеграція з IoT, використання AI для управління мережами. |
| Перспективи використання Wi-Fi 7 у майбутніх інфраструктурах | Використання в розумних містах, підтримка AR/VR, покращення повсякденного життя. |

Порівнюючи продуктивність Wi-Fi 7 із попередніми стандартами, покращення вражають [5]. Повідомляється, що пропускна здатність Wi-Fi 7 на 480% більша, ніж у його попередників, що означає, що користувачі можуть відчути значно вищу швидкість Інтернету та розширене підключення [6]. Крім того, підтримка стандартом розширених функцій, таких як технологія Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO), дозволяє підвищити продуктивність у середовищах із великою кількістю підключених пристроїв [7]. Ця еволюція продуктивності особливо важлива, оскільки все більше домогосподарств і компаній покладаються на кілька пристроїв одночасно для таких дій, як потокове передавання, ігри та відеоконференції, для яких потрібен високошвидкісний доступ до Інтернету. Удосконалення Wi-Fi 7 змінило правила гри як для споживачів, так і для компаній.

Очікуваний вплив Wi-Fi 7 на індустрію бездротових технологій є глибоким [8]. У міру того, як цей стандарт нового покоління набуде широкого поширення, очікується, що він сприятиме зростанню кількості підключених пристроїв і додатків, відображаючи досягнення, які спостерігаються в стільникових технологіях, таких як 4G і 5G [9]. Розширені можливості Wi-Fi 7, ймовірно, підтримуватимуть нові технології, такі як доповнена реальність (AR), віртуальна реальність (VR) та Інтернет речей (IoT), які вимагають значної пропускної здатності та низької затримки для оптимальної продуктивності [10] (рис. 1.4). Забезпечуючи ефективнішу та надійнішу бездротову інфраструктуру, Wi-Fi 7 може переосмислити досвід користувачів, стимулювати інновації та, зрештою, сформувати майбутній ландшафт підключення в різних секторах. Представлення Wi-Fi 7 обіцяє розпочати нову еру бездротових технологій, які надають пріоритет швидкості, надійності та ємності.

Технології багатоканального доступу (MLO - Multi-Link Operation)

Принцип роботи багатоканального режиму (MLO) у технології Wi-Fi базується на одночасному використанні кількох частотних діапазонів для покращення можливостей підключення та передачі даних [11]. У типовій мережі Wi-Fi є принаймні одна точка доступу та один клієнт, але MLO дозволяє одночасно

підключатися кількома пристроям через різні канали. Цей підхід значно покращує загальну ефективність передачі даних, дозволяючи пристроям передавати та отримувати інформацію в різних діапазонах. Використовуючи можливості MLO, мережі Wi-Fi можуть досягти більш надійного з'єднання, оскільки система може динамічно перемикатися між діапазонами на основі поточних умов, забезпечуючи оптимальну продуктивність і надійність [12].

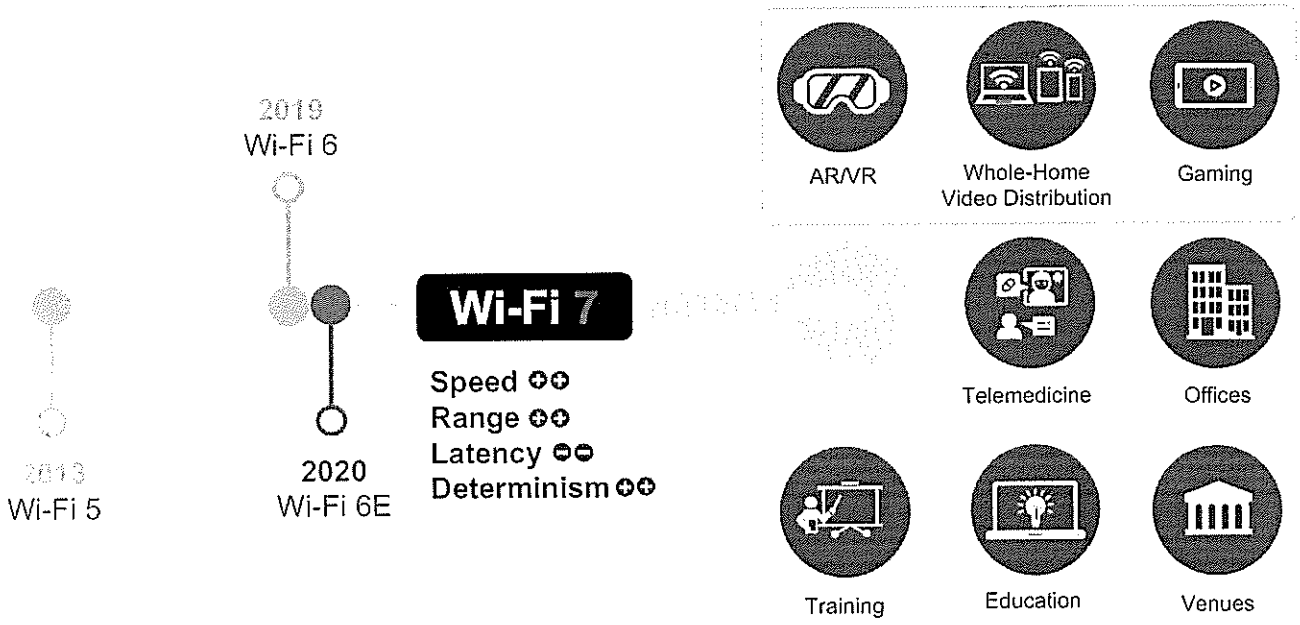



Рис. 1.4. Значення технології Wi-Fi 7 для майбутнього.

Однією з найважливіших переваг MLO є його здатність збільшувати пропускну здатність, що безпосередньо сприяє підвищенню пропускної здатності [13]. Дозволяючи пристроям використовувати декілька діапазонів частот одночасно, MLO може подвоїти або навіть потроїти доступну смугу пропускання для передачі даних. Це покращення означає, що користувачі можуть відчути швидшу швидкість завантаження та завантаження, зменшену затримку та вищу надійність підключень. Наприклад, із вдосконаленням стандартів Wi-Fi, таких як Wi-Fi 6E та Wi-Fi 7, запровадження MLO може ще більше підвищити ці переваги, забезпечуючи безперебійний досвід для додатків, які потребують високої швидкості передачі даних, таких як потокове передавання та ігри. [14] [15].

Збільшення пропускної здатності може призвести до покращення якості обслуговування, що зробить MLO критичним досягненням у технології Wi-Fi.

Незважаючи на потенційні переваги, реалізація MLO в реальних сценаріях представляє кілька проблем [16]. Однією з головних перешкод є складність керування кількома з'єднаннями та забезпечення того, що пристрої можуть ефективно спілкуватися в різних частотних діапазонах без перешкод. Це вимагає складних алгоритмів і протоколів для оптимізації потоку даних і підтримки сталої продуктивності. Крім того, широке впровадження MLO залежатиме від сумісності існуючого апаратного забезпечення та необхідності впровадження нових стандартів на різних пристроях. Такі проблеми, як перевантаження мережі та фізичні обмеження певних середовищ, також можуть вплинути на ефективність MLO. Таким чином, вирішення цих проблем має важливе значення для реалізації повного потенціалу Multi-Link Operation у вдосконаленні технологій Wi-Fi.

Розширення спектральної ефективності в Wi-Fi 7

Одним із значних досягнень у Wi-Fi 7 є використання модуляції 4096-QAM, яка відіграє важливу роль у збільшенні швидкості передачі даних [17]. Ця розширена схема модуляції забезпечує більш ефективне представлення даних, що призводить до потенційного збільшення максимальної номінальної швидкості передачі даних з 9,6 Гбіт/с у Wi-Fi 6 до вражаючих 46 Гбіт/с [7]. Використовуючи 4096-QAM, Wi-Fi 7 може передавати більше бітів на символ, підвищуючи пропускну здатність без додаткової смуги пропускання. Це покращення має вирішальне значення, особливо для додатків, які потребують високошвидкісного Інтернету, наприклад для потокового вмісту високої чіткості та онлайн-ігор, де низька затримка та висока пропускна здатність є важливими для оптимального досвіду.

Іншою важливою особливістю Wi-Fi 7 є розширення смуги пропускання каналу до 320 МГц, що значно підвищує його пропускну здатність для передачі даних [18]. Це подвоєння пропускної здатності порівняно з попередніми стандартами дозволяє одночасно передавати більше даних, тим самим підвищуючи загальну ефективність мережі. Завдяки використанню тих самих частотних

діапазонів 2,4, 5 і 6 ГГц, ця більша ширина каналу ефективно вміщує більше користувачів і пристроїв, зменшуючи затори в багатолюдних середовищах. Потенційні переваги цієї розширеної ширини каналу включають: — Покращена якість потокового передавання відео 4K і 8K - Більш плавний досвід онлайн-ігор — Покращена продуктивність у додатках IoT Ці досягнення позиціонують Wi-Fi 7 як надійне рішення для зростаючого попиту на високошвидкісне бездротове підключення.

Крім того, ефективне керування частотним спектром є ще однією перевагою Wi-Fi 7, яка підвищує його продуктивність [19]. Завдяки оптимізації використання доступних діапазонів частот Wi-Fi 7 може мінімізувати перешкоди та збільшити пропускну здатність, що особливо корисно в густонаселеному міському середовищі, де багато пристроїв конкурують за пропускну здатність. Ефективне керування спектром не тільки покращує надійність з'єднань, але й покращує взаємодію з користувачами, забезпечуючи стабільніші та швидші з'єднання. Як результат, Wi-Fi 7 має великі перспективи для майбутніх додатків, оскільки він може ефективно підтримувати зростаючу кількість підключених пристроїв і зростаючий попит на високошвидкісний Інтернет у різних секторах, включаючи розумні будинки та корпоративні середовища.

Інтеграція технологій для інтелектуальних мереж

Інтеграція технологій OFDMA (множинний доступ з ортогональним частотним поділом) і MU-MIMO (багатокористувацький множинний вхід і множинний вихід) має ключове значення для оптимізації одночасних з'єднань у розумних мережах [20]. OFDMA дозволяє кільком пристроям отримувати дані одночасно, значно зменшуючи затримку та підвищуючи швидкість передачі даних [21]. Ця можливість має вирішальне значення в середовищах, де підключено багато пристроїв, наприклад у розумних будинках або офісах, оскільки вона гарантує мінімізацію перевантаження мережі. Використовуючи MU-MIMO, який дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати один канал, мережі Wi-Fi можуть ще більше підвищити ефективність у періоди високого попиту. Поєднання цих технологій призводить до більш надійної та чутливої мережі, здатної

працювати зі зростаючою кількістю інтелектуальних пристроїв, які потребують постійного підключення.

Інтеграція Wi-Fi 7 з пристроями IoT (Інтернет речей) означає значний крок вперед у можливостях бездротових мереж [22]. Очікується, що Wi-Fi 7 підтримуватиме вищу швидкість передачі даних і покращену продуктивність, що робить його ідеальним рішенням для додатків Інтернету речей, які потребують передачі даних у реальному часі [18]. З передбачуваною швидкістю передачі даних, яка вчетверо перевищує швидкість його попередника, Wi-Fi 6, цей новий стандарт сприятиме більш ефективному зв'язку між різноманітними розумними пристроями, від систем домашньої автоматизації до промислових датчиків [7]. Можливість працювати в діапазоні 6 ГГц також розширює спектр, доступний для зв'язку IoT, дозволяючи збільшити пропускну здатність і зменшити перешкоди. Ця інтеграція не тільки покращує функціональність окремих пристроїв, але й сприяє безперебійній роботі цілих розумних екосистем.

Штучний інтелект (AI) зіграє трансформаційну роль в управлінні мережами Wi-Fi, підвищуючи їх ефективність і надійність [23]. Використовуючи алгоритми штучного інтелекту, мережеві адміністратори можуть аналізувати величезні обсяги даних, створених підключеними пристроями, дозволяючи динамічно коригувати мережеві конфігурації в реальному часі. Ця можливість забезпечує оптимальну продуктивність, оскільки система може адаптуватися до мінливих умов і моделей використання. Наприклад, штучний інтелект може передбачати перевантаження мережі та автоматично перерозподіляти ресурси, щоб запобігти уповільненню, значно покращуючи роботу користувача. Крім того, застосування штучного інтелекту в управлінні Wi-Fi підтримує розширені заходи безпеки, допомагаючи виявляти та пом'якшувати потенційні загрози до того, як вони вплинуть на мережу. У міру розвитку цих технологій синергія між штучним інтелектом і Wi-Fi створюватиме більш інтелектуальні та оперативні мережі, сприяючи подальшому розвитку розумних інфраструктур.

Перспективи використання Wi-Fi 7 у майбутніх інфраструктурах

Завдяки розширеним можливостям Wi-Fi 7 зробить революцію в промислових мережах та інфраструктурах розумних міст [24]. Цей бездротовий стандарт наступного покоління обіцяє збільшити максимальну номінальну швидкість передачі даних більш ніж у чотири рази порівняно з його попередником, Wi-Fi 6, досягнувши максимальної швидкості 46 Гбіт/с [25]. Такі вражаючі швидкості необхідні для функціонування розумних міст, де безліч пристроїв і систем, починаючи від керування дорожнім рухом і закінчуючи моніторингом навколишнього середовища, вимагають безперебійного підключення. Крім того, у промислових умовах Wi-Fi 7 може підтримувати розгортання передових бездротових сенсорних мереж, які сприяють обміну даними в реальному часі та автоматизації. Переваги використання Wi-Fi 7 у цих областях включають: - Підвищена ефективність роботи — Покращена аналітика даних - Зменшена затримка в спілкуванні - Більша масштабованість мережевої інфраструктури.

# РОЗДІЛ 2. СТАН ПРОБЛЕМИ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

## 2.1. Основи теорії розповсюдження радіохвиль

Фізичні основи радіохвиль пов'язані з електромагнітним полем, які викликані впливом електричних і магнітних полів [1]. Ці поля взаємодіють один з одним і індивідуально електромагнітні хвилі, які здатні розповсюджуватися у вакуумі та атмосфері [1]. Основні принципи, що лежать на основі радіохвиля, описуються рівняннями Максвелла, які передбачають, що зміни в електричних полях викликають зміни в магнітних полях і навпаки [1]. Це взаємозв'язок між електричними і магнітними полями є ключовим для розуміння природи радіохвиль та їх здатності до передачі інформації на відстані.

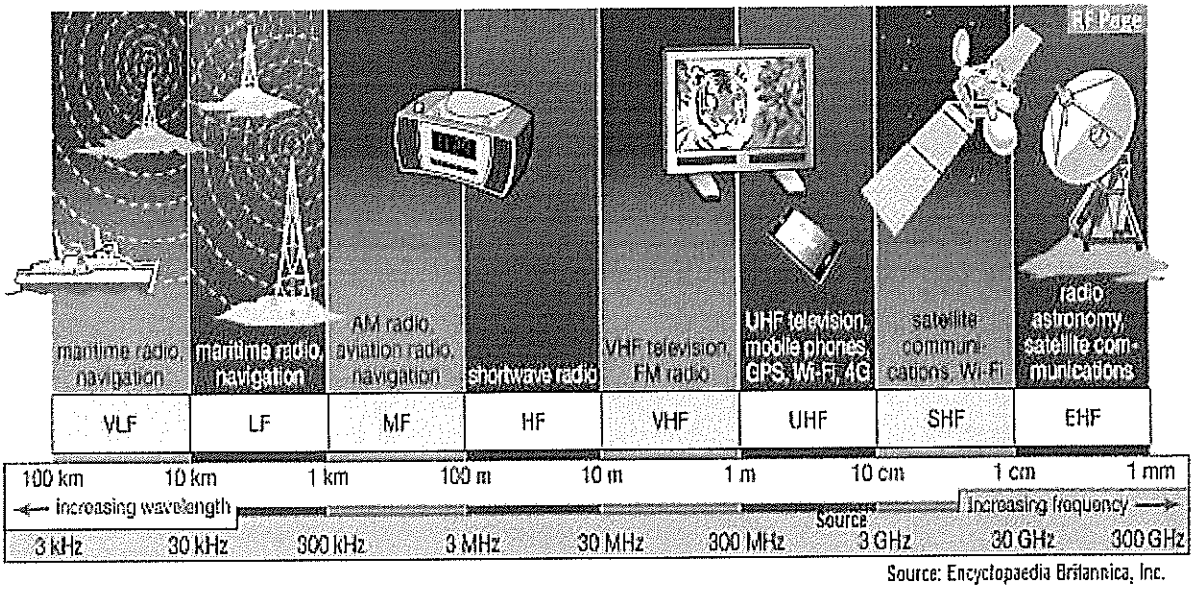



Рис. 2.1. Діапазони радіохвиль

Основні параметри радіохвиль, такі як частота, довжина хвилі та амплітуда, додають свої характеристики та впливають на їхню здатність до розповсюдження [2]. Частота радіохвиль визначає кількість коливань, які відбуваються за одиницю часу, в той час як довжина хвилі відстань між двома наступними максимумами або

мінімумами хвилі [1]. Амплітуда, у своєму процесі, змінює потужність сигналу; чим вища амплітуда, тим сильніший сигнал [3]. Ці параметри не лише використовують якість передачі радіосигналів, але й впливають на їх здатність проходити крізь інше середовище, що є критичним місцем у радіозв'язку.

Спектральний розподіл радіохвиль охоплює різні розділи частот, які використовуються в телекомунікаціях та інших технологіях [4]. Радіохвилі класифікуються за частотами, що дозволяють змінювати їх призначення та використовувати в різних системах зв'язку [3]. Наприклад, короткохвильові радіохвилі застосовуються для міжнародного зв'язку, тоді як ультракороткі хвилі часто застосовуються для FM-радіо та телевізійних передач [5]. Розуміння спектрального розподілу радіохвиль є місцем для розробки ефективних радіозв'язкових систем і забезпечення безперебійної передачі інформації в різних умовах.

Закони розповсюдження радіохвиль

Закон оберненого квадрата для втрат сигналу є основоположним принципом, який описує, як інтенсивність радіосигналу зменшується з відстанню джерела випромінювання [4]. Згідно з цим законом, потужність сигналу, що досягає приймача, обернено пропорційна квадрату відстані між передавачем і приймачем. Це означає, що якщо відстань подвоюється, інтенсивність сигналу зменшується в чотирьох разах. принцип має виключно важливе значення при проектуванні цього радіозв'язку, оскільки він допомагає інженерам встановити параметри для забезпечення належної якості зв'язку на великих відстанях. Таким чином, розуміння цього закону дозволяє ефективно планувати радіомережі та підвищувати їхню продуктивність.

Рефлексія, рефракція та дифракція радіохвиль є кількістю явищ, що впливають на їхнє поширення в атмосфері [4]. Рефлексія відбувається, коли радіохвилі відбиваються від поверхонь, таких як Земля або будинок, що може призвести до створення багаторазових шляхів сигналу. Рефракція, у свій час, відбувається, коли хвилі проходять через різні шари атмосфери, що має значний вплив на їх швидкість і напрямок [6]. Дифракція відзначається, коли хвилі

викликають перешкоди, що дозволяють сигналам досягти областей, які можуть бути заблоковані прямим шляхом. Усі ці явища повинні бути враховані при розробці радіозв'язку, оскільки вони можуть суттєво вплинути на якість та надійність передачі сигналів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1.

Частотні діапазони радіохвиль та їх використання

| Діапазон | Частота | Довжина хвилі | Застосування |
|---|---|---|---|
| LF | 30 - 300 кГц | 1 000 - 10 000 м | Навігація, морські комунікації |
| MF | 300 кГц - 3 МГц | 100 - 1 000 м | AM-радіомовлення, навігація |
| HF | 3 - 30 МГц | 10 - 100 м | Короткохвильове радіо, військовий зв'язок |
| VHF | 30 - 300 МГц | 1 - 10 м | FM-радіо, телебачення, авіаційний зв'язок |
| UHF | 300 МГц - 3 ГГц | 0,1 - 1 м | Мобільний зв'язок, Wi-Fi, телебачення |
| SHF | 3 - 30 ГГц | 1 - 10 см | 5G, супутниковий зв'язок, мікрохвилі |
| EHF | 30 - 300 ГГц | 1 - 10 мм | Міліметрові хвилі для 5G, радіолокація |

Поглинання радіохвиль у різних середовищах також є критичним аспектом теорії розповсюдження радіохвиль [2]. Поглинання відбувається, коли енергія радіосигналу перетворюється на тепло при проходженні через різні матеріали, такі як повітря, вода або конструкція. У залежності від частоти сигналу та властивостей середовища, поглинання може мати різний рівень впливу на сигнал. Наприклад, високочастотні радіохвилі більше поглинаються вологою у повітрі, низькочастотні [7]. Знання про поглинання радіохвиль дозволяє інженерам коригувати потужність

передавачів частот і вибирати оптимальні параметри для досягнення максимальної ефективності зв'язку в конкретних умовах середовища.

Типи середовищ для розповсюдження радіохвиль

Поширення радіохвиль у вільному просторі представляє найбільш простий сценарій для розуміння поведінки радіохвиль [4]. У цьому ідеалізованому середовищі радіохвилі поширюються без будь-яких перешкод, що забезпечує безперешкодну передачу енергії. Вільний простір характеризується своєю однорідністю та непоглинальністю, що означає, що радіохвилі можуть ефективно поширюватися на великі відстані. Це явище має вирішальне значення для різних комунікаційних систем, оскільки воно встановлює базову лінію для показників продуктивності. Розуміння того, як радіохвилі поводяться у вільному просторі, також дає цінну інформацію про те, як вони взаємодіють з різними середовищами та перешкодами, тим самим впливаючи на проектування та експлуатаційні аспекти систем радіозв'язку.

На відміну від вільного простору, міське середовище створює унікальні проблеми для поширення радіохвиль через наявність будівель та інших споруд [8]. Ці перешкоди можуть відбивати, заломлювати або дифрагувати радіохвилі, що призводить до складних моделей розповсюдження, які можуть суттєво впливати на силу та якість сигналу. Наприклад, радіотінь може утворюватися за великими будівлями, створюючи зони, де сигнал слабкий або зовсім відсутній. Крім того, взаємодія радіохвиль з міською інфраструктурою може призвести до багатошляхового поширення, коли сигнали проходять кілька шляхів, щоб досягти приймача. Це може призвести до конструктивних або деструктивних перешкод, ускладнюючи прийом і чіткість переданого сигналу. Таким чином, розуміння міського розповсюдження має важливе значення для забезпечення надійного зв'язку в густонаселених районах.

Коли справа доходить до внутрішнього середовища, на поширення радіохвиль впливають різні фактори, які суттєво відрізняються від тих у вільному просторі чи міських умовах [9]. Матеріали, які використовуються в будівництві, наприклад бетон, метал і скло, можуть поглинати або відбивати радіохвилі,

впливаючи на силу сигналу та якість передачі. Крім того, планування простору, включаючи стіни та меблі, може створювати бар'єри, які ще більше ускладнюють поширення хвилі. Ці характеристики вимагають впровадження спеціальних стратегій для підвищення надійності зв'язку, таких як використання повторювачів або регулювання частот передачі для кращого проходження перешкод. Розуміння унікальної динаміки розповсюдження в замкнутих просторах є життєво важливим для проектування ефективних внутрішніх систем зв'язку, які можуть підтримувати стабільні з'єднання, незважаючи на виклики, пов'язані з навколишнім середовищем.

Моделі розповсюдження радіохвиль (табл. 2.2).

Модель втрат на шляху вільного простору (FSPL) є фундаментальною концепцією розповсюдження радіохвиль, особливо важливою для сценаріїв, коли між передавачем і приймачем є пряма видимість [10]. Ця модель розраховує втрату потужності сигналу під час проходження радіохвиль у вільному просторі, надаючи важливу інформацію про зони покриття та параметри обладнання. FSPL виражається математично з урахуванням таких факторів, як частота, відстань і швидкість світла, що дозволяє інженерам оцінити, наскільки потужність сигналу зменшиться на заданій відстані. У практичних застосуваннях розуміння FSPL має вирішальне значення для розробки ефективних систем зв'язку, особливо в середовищах, де перешкоди мінімальні.

У середовищах, де присутні перешкоди та багатопроменевість, моделі, які враховують перешкоди, стають життєво важливими, причому моделі Релея та Річіан є двома яскравими прикладами [2]. Модель Релея особливо застосовна в міських умовах, де численні відбиття викликають значне завмирання сигналу через випадкове розсіювання радіохвиль. З іншого боку, модель Rician корисна в сценаріях, де існує домінуючий прямий шлях поряд із розсіяними сигналами, наприклад, у приміських районах. Використовуючи ці моделі, інженери можуть краще прогнозувати поведінку сигналу за різних умов, створюючи більш надійні системи зв'язку, адаптовані до конкретних середовищ.

Таблиця 2.2.

Моделі розповсюдження радіохвиль

| Модель | Частотний діапазон, ГГц | Дальність, км | Похибка, дБ | Особливості |
|---|---|---|---|---|
| Модель вільного простору (Free-Space Path Loss) | 0.1 - 100 | до 20 | ±2 | Ідеалізовані умови, відсутність перешкод |
| Модель Rayleigh | 0.8 - 2.5 | до 5 | ±6 | Сильне багатопроменеве поширення |
| Модель Rician | 0.8 - 2.5 | до 10 | ±4 | Значний прямий компонент сигналу |
| Модель COST-231 | 0.8 - 2.0 | до 3 | ±8 | Для міських умов, враховує багатоповерхівки |
| Модель ITU-R | 1.0 - 3.5 | до 2 | ±5 | Емпірична модель для різних середовищ |

Емпіричні моделі, такі як COST-231 та ITU-R, відіграють вирішальну роль у проектуванні та оцінці мереж Wi-Fi та інших систем бездротового зв'язку [4]. Модель COST-231, яка є розширенням моделі Hata, особливо ефективна для макро- та мікростільникових середовищ, надаючи рекомендації щодо оптимізації бездротового покриття в міських і приміських районах. Подібним чином моделі ITU-R пропонують стандартизовані методи для вимірювання втрат на трасі та потужності сигналу, забезпечуючи узгодженість у різних сценаріях. Ці емпіричні підходи базуються на обширних польових вимірюваннях і статистичному аналізі, що дозволяє точно прогнозувати поведінку радіохвиль у реальних умовах, що є важливим для ефективного планування та розгортання мережі.

Вплив навколишніх умов на розповсюдження радіохвиль (рис. 2.2).

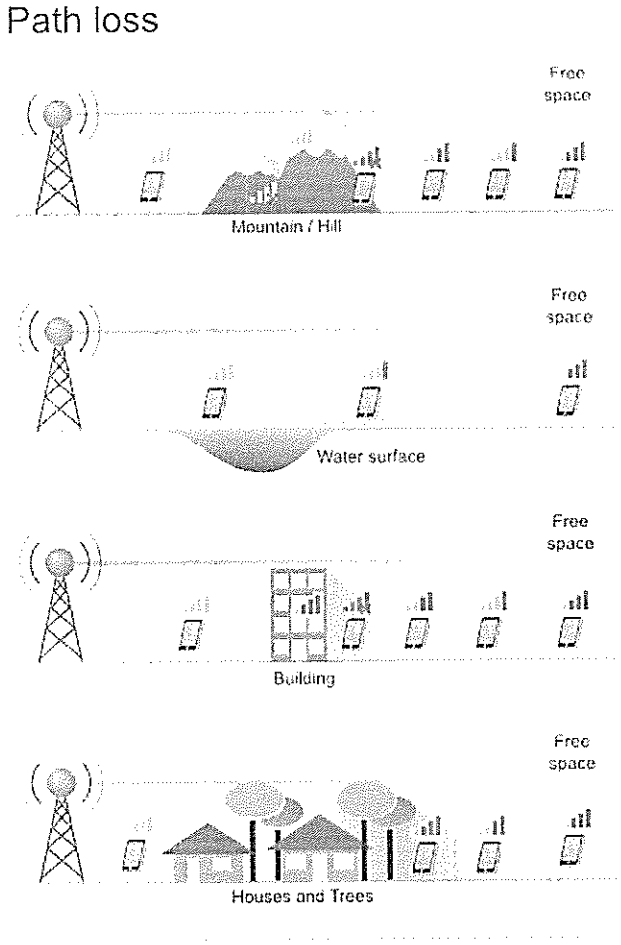



Рис. 2.2. Вплив навколишніх умов на розповсюдження радіохвиль

Погодні умови відіграють вирішальну роль у поширенні радіохвиль, суттєво впливаючи на їх силу та надійність [11]. Такі фактори, як дощ, туман і сніг, можуть послабити радіосигнали, особливо в міліметровому діапазоні, де опади мають виражений вплив [12]. Коли радіохвилі стикаються з гідрометеорами, вони зазнають поглинання та розсіювання, що призводить до зниження якості сигналу. Наприклад, відомо, що дощ є основним поглиначем для супутникових антен із сантиметровою довжиною хвилі, що може ще більше ускладнити зв'язок за несприятливих погодних умов [13]. Розуміння цих ефектів є життєво важливим для розробки надійних систем зв'язку, які можуть ефективно працювати в різних сценаріях навколишнього середовища.

Щільність населення також має істотний вплив на поглинання радіосигналів [14]. У міських районах з високою щільністю населення наявність будівель і споруд може призвести до збільшення поглинання та відбиття сигналу, що призводить до складного середовища розповсюдження. Коли радіохвилі проходять через такі населені райони, вони стикаються з численними перешкодами, які можуть порушити їх шляхи, викликаючи багатошляхове поширення та погіршення сигналу. Це явище є особливо актуальним у контексті стільникових мереж, де ефективне покриття та якість обслуговування значною мірою залежать від навколишнього середовища та його впливу на передачу сигналу [2]. Вирішення цих проблем вимагає ретельного планування та оптимізації мережевої інфраструктури.

Об'єкти, що рухаються, наприклад транспортні засоби та пішоходи, також впливають на поширення радіохвиль у міських умовах [2]. Присутність цих об'єктів може призвести до динамічних змін у радіосередовищі, викликаючи коливання потужності та якості сигналу. Коли транспортні засоби рухаються через зону бездротового зв'язку, вони можуть створювати ефект тіні та змінювати шлях радіохвиль, що призводить до перешкод і згасання сигналу. Подібним чином рух людей може сприяти змінам у прийомі сигналу, особливо в людних місцях. Розуміння впливу цих рухомих об'єктів має важливе значення для розробки адаптивних комунікаційних технологій, які можуть підтримувати надійні з'єднання, незважаючи на зміни навколишнього середовища [6].

## 2.2. Вплив середовища на розповсюдження радіохвиль

Характеристики середовища як фактора впливу на розповсюдження радіохвиль

На поширення радіохвиль суттєво впливає тип середовища, через яке вони проходять, включаючи відкритий простір, міські території та закриті середовища [1]. У відкритому просторі радіохвилі можуть поширюватися з мінімальними перешкодами, що забезпечує відносно просту передачу та прийом (табл. 2.3).

Таблиця 2.3.

Вплив середовища на розповсюдження радіохвиль

| Фактор впливу | Опис | Вплив на розповсюдження | Оцінка впливу на затухання сигналу (1-5) |
|---|---|---|---|
| Тип середовища | Вплив відкритого простору, міських територій і закритих приміщень на передачу сигналу. | Залежно від середовища сигнал може поширюватися з мінімальними перешкодами або втратами. | 1 - Мінімальний вплив |
| Поглинання в матеріалах | Різні матеріали (бетон, скло, метал) по-різному впливають на поширення радіохвиль. | Матеріали з високим рівнем поглинання, як бетон, значно знижують потужність сигналу. | 5 - Дуже високий вплив |
| Географічні та кліматичні умови | Температура, вологість, тиск і географічні особливості змінюють поведінку хвиль. | Зміни температури, вологості та тиску можуть викликати заломлення і розсіювання радіохвиль. | 4 - Високий вплив |
| Будівлі та архітектура | Відбиття та проникнення сигналів через стіни та фасади будівель. | Відбиття сигналів від будівель створює багатопроменеві ефекти, які впливають на якість передачі. | 4 - Високий вплив |
| Рослинність | Поглинання сигналу залежно від типу та щільності рослинності. | Щільна рослинність може поглинати або розсіювати хвилі, знижуючи силу сигналу. | 3 - Середній вплив |
| Погодні явища | Дощ, сніг і туман знижують якість передачі сигналу. | Дощ і сніг посилюють загасання сигналу, особливо на високих частотах. | 4 - Високий вплив |

| Фактор впливу | Опис | Вплив на розповсюдження | Оцінка впливу на затухання сигналу (1-5) |
|---|---|---|---|
| Водойми | Відбиття та дифракція хвиль від поверхні води впливають на дальність і якість сигналу. | Відбиття від води може посилювати або знижувати силу сигналу в залежності від кута падіння. | 2 - Низький вплив |

Однак у міських районах наявність будівель та інших споруд створює складне середовище, де радіохвилі можуть відбиватися, заломлюватися та дифрагувати, що призводить до проблем із чіткістю та силою сигналу [2]. У закритому середовищі, наприклад у приміщенні, радіохвилі можуть стикатися з додатковими перешкодами через стіни та меблі, які можуть поглинати або розсіювати хвилі, ще більше впливаючи на їх поширення. Розуміння цих різних середовищ має вирішальне значення для ефективного телекомунікації та проектування сигналу, оскільки кожне налаштування має унікальні характеристики розповсюдження (табл. 2.3).

Поглинання радіохвиль у різних матеріалах відіграє вирішальну роль у визначенні ефективності передачі сигналу [1]. Різні матеріали мають різні властивості, які впливають на те, як вони взаємодіють з радіохвилями. Наприклад, такі матеріали, як бетон і метал, можуть значно послаблювати сигнали, що призводить до зменшення потужності сигналу, коли хвилі проходять через ці поверхні або відбиваються від них [3]. Навпаки, такі матеріали, як скло та дерево, як правило, менше впливають на поширення радіохвиль, що забезпечує чіткішу передачу. Це явище поглинання особливо актуальне в міських умовах, де будівельні матеріали можуть сильно відрізнятися, що вимагає ретельного розгляду при плануванні систем радіозв'язку для забезпечення надійного покриття сигналу.

Географічні та кліматичні умови також мають великий вплив на поширення радіохвиль [4]. Наприклад, тропосфера Землі, яка є найнижчим шаром атмосфери, суттєво впливає на поширення радіохвиль, змінюючи їх швидкість і напрямок [5].

Такі фактори, як температура, вологість і атмосферний тиск, можуть призводити до зміни поведінки радіохвиль, у тому числі до заломлення та розсіювання, що може підвищити або погіршити якість сигналу. Крім того, такі географічні об'єкти, як гори, долини та водойми, можуть перешкоджати або відбивати радіохвилі, створюючи зони прийому сильного та слабкого сигналу. Розуміння цих впливів навколишнього середовища має важливе значення для оптимізації систем радіозв'язку та забезпечення ефективного покриття в різноманітних умовах.

Вплив будівель та архітектури

Одним із важливих способів впливу будівель і архітектури на поширення радіохвиль є відбиття сигналів від стін і фасадів [6]. Подібно до світлових хвиль, радіохвилі стикаються з різними поверхнями, що може призвести до відскоку, змінюючи їхню траєкторію та потенційно погіршуючи сигнал. Це відображення може створювати складні візерунки перешкод, які впливають на силу та якість прийнятого сигналу. Ступінь відбиття сигналу значною мірою залежить від властивостей матеріалу будівельних поверхонь, таких як: - Текстура поверхні - Склад матеріалу (наприклад, бетон, скло, дерево) - Кут падіння Розуміння цих факторів має вирішальне значення для оптимізації систем радіозв'язку в міських умовах, де переважають будівлі (рис. 2.3).

Крім відбиття, проникнення радіосигналів через будівельні матеріали відіграє вирішальну роль у визначенні покриття та сили сигналу [3]. Різні матеріали різною мірою поглинають і послаблюють радіохвилі, що може суттєво впливати на здатність сигналів проникати через стіни та досягати внутрішніх пристроїв. Наприклад, відомо, що такі матеріали, як бетон і метал, спричиняють вищий рівень ослаблення сигналу порівняно з деревиною чи гіпсокартоном. Ця зміна здатності проникнення може призвести до: - Зменшення потужності сигналу всередині будівель - Збільшення мертвих зон в областях, екранованих товстими матеріалами - Змінність якості сигналу в залежності від конструкції будівлі Аналізуючи ці впливи, інженери можуть розробити стратегії посилення проникнення сигналу, такі як оптимізація розміщення антен або використання повторювачів для покращення покриття в складних умовах.

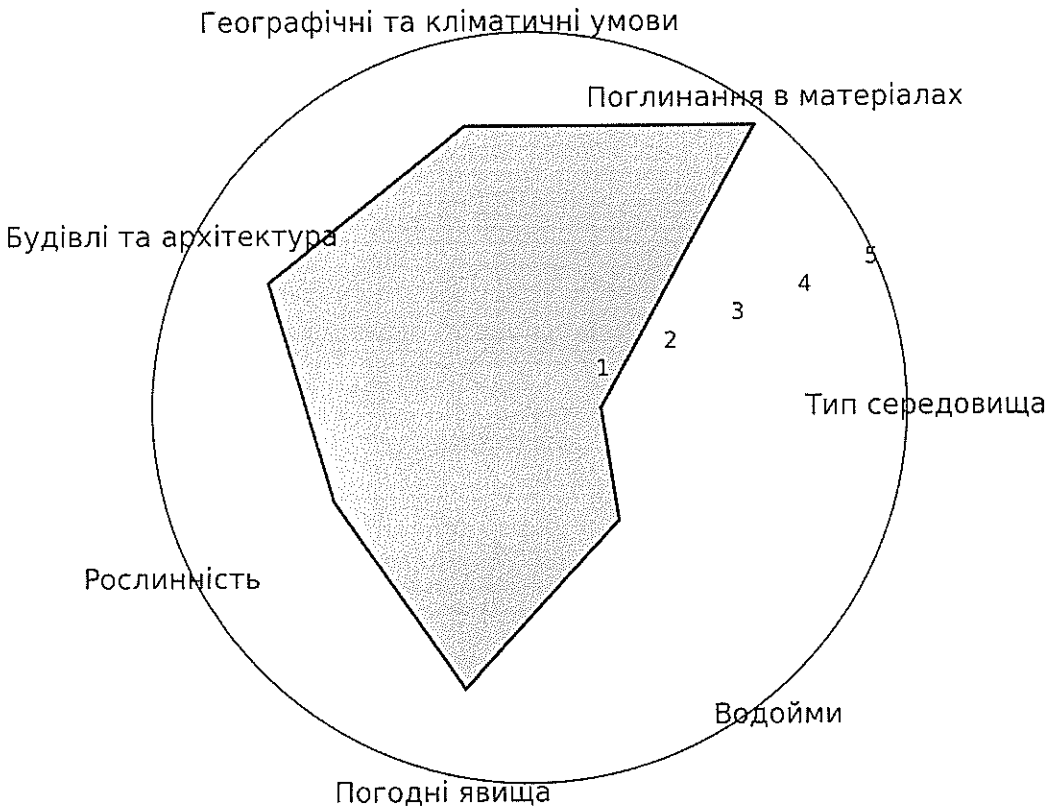



Рис. 2.3. Вплив факторів на розповсюдження радіохвиль

Крім того, зонування покриття в багатоповерхових будинках створює унікальні проблеми для поширення радіохвиль [1]. Оскільки радіосигнали проходять різними поверхами та між кімнатами, на них можуть впливати численні фактори, зокрема висота будівлі та розташування стін і підлоги. Характеристики поширення радіохвиль можуть призвести до нерівномірного покриття, що часто призводить до слабшого сигналу на певних рівнях. Основні міркування включають: - Орієнтація будівлі та її вікон - Відстань від джерела передачі до приймача - Внутрішні структурні плани, які можуть створювати перешкоди Ефективне вирішення цих проблем передбачає використання передових методів моделювання для прогнозування поведінки сигналу в усій будівлі, гарантуючи, що системи зв'язку розроблені для забезпечення надійного покриття на всіх рівнях конструкції.

Рослинність та природні перешкоди

Наявність дерев і рослинності істотно впливає на ослаблення радіосигналів [7]. Коли радіохвилі стикаються з рослинною речовиною, частина їхньої енергії

поглинається або розсіюється, що призводить до зменшення потужності сигналу. Ступінь цього ослаблення залежить від таких факторів, як тип рослинності, її щільність і частота радіохвиль. Наприклад, більш густі ліси можуть поглинати більше енергії сигналу порівняно з рідкісними чагарниками. Ця взаємодія між радіохвилями та рослинністю може призвести до: - Збільшення втрати сигналу в районах з густим лісом - Змінність потужності сигналу залежно від типу рослини та стадії росту - Можливість зниження якості зв'язку в сільській місцевості, оточеній густим листям Як наслідок, розуміння впливу рослинності на розповсюдження сигналу має вирішальне значення для розробки ефективних систем зв'язку в різноманітних середовищах.

Погодні явища, такі як дощ і сніг, також відіграють вирішальну роль у поширенні радіохвиль [8]. Ці гідрометеори можуть послабити радіосигнали, коли вони проходять через атмосферу, викликаючи значні зміни в передачі сигналу. Наприклад, дощ може спричинити розсіювання та поглинання радіохвиль, особливо на високих частотах. Цей ефект особливо виражений за несприятливих погодних умов і може призвести до: - Зниження якості сигналу під час сильного дощу - Переривчасте з'єднання в умовах снігу або туману - Підвищена складність підтримки зв'язку на певних частотах Розуміння того, як різноманітні погодні умови впливають на поширення радіохвиль, має важливе значення для оптимізації систем зв'язку, особливо в регіонах, схильних до суворої погоди.

Наявність водойм також може впливати на поширення радіохвиль, створюючи унікальні проблеми для передачі сигналу [1]. Коли радіохвилі стикаються з такими поверхнями, як озера чи океани, вони можуть зазнавати відбиття та дифракції, що може посилювати або зменшувати силу сигналу залежно від ситуації. Наприклад, водні поверхні можуть діяти як відбивачі, дозволяючи сигналам відбиватися та потенційно створювати перешкоди для інших передач. Основні моменти, які слід враховувати, включають: - Потенціал збільшення дальності, коли сигнали відбиваються від поверхні води - Ризик багатопроменевої інтерференції через відбиття - Змінність потужності сигналу в залежності від кута падіння та частоти Ці фактори підкреслюють складну взаємодію між радіохвилями

та особливостями навколишнього середовища, наголошуючи на необхідності ретельного розгляду під час планування комунікаційної інфраструктури поблизу водойм.

Ефекти багатопроменевого поширення

Інтерференція хвиль відіграє вирішальну роль у багатопроменевому розповсюдженні, де радіохвилі можуть проходити кількома маршрутами від передавача до приймача [6]. Це явище виникає внаслідок відбиття, заломлення та дифракції хвиль, коли вони стикаються з різними перешкодами в навколишньому середовищі, такими як будівлі та природний рельєф [1]. Результатом є складна взаємодія хвиль, яка може посилити або послабити сигнал на приймальному кінці. Коли хвилі зустрічаються, вони можуть конструктивно перешкоджати, посилюючи сигнал, або деструктивно, послаблюючи його. Ці перешкоди не тільки впливають на якість зв'язку, але й ускладнюють проектування бездротових систем. Крім того, для інженерів важливо враховувати ці моделі перешкод, щоб оптимізувати чіткість і надійність сигналу.

Утворення стоячих хвиль у замкнутих просторах є ще одним значним ефектом багатопроменевого поширення [9]. У таких середовищах, як закриті кімнати, радіохвилі відбиваються від стін та інших поверхонь, створюючи умови, коли певні частоти посилюються, а інші – зменшуються. Це призводить до виникнення стоячих хвиль, які можуть створювати області конструктивної інтерференції (вузли) і деструктивної інтерференції (пучності). Розуміння цих моделей має вирішальне значення для забезпечення ефективного спілкування в таких просторах, особливо для таких програм, як мережі Wi-Fi або радіомовлення. Аналізуючи розміри приміщення та матеріали, інженери можуть передбачити поведінку стоячих хвиль і скоригувати розміщення передавачів і приймачів для підвищення потужності сигналу та покриття.

Щоб пом'якшити вплив багатопроменевого поширення, можна застосувати декілька методів [10]. Одним з ефективних підходів є адаптивне вирівнювання підсилення, яке передбачає регулювання підсилення приймальних пристроїв на основі змінної потужності сигналу, викликаної ефектами багатопроменевого

поширення. Ця техніка забезпечує більш узгоджений вихідний сигнал, покращуючи загальну якість зв'язку. Додаткові стратегії можуть включати використання схем рознесення, коли кілька антен приймають однаковий сигнал, зменшуючи вплив перешкод і підвищуючи надійність лінії зв'язку. Крім того, правильний дизайн системи та вибір відповідних частот можуть мінімізувати шкідливі наслідки багатошляхового розповсюдження, створюючи більш надійні та ефективні системи бездротового зв'язку.

Вплив рухомих об'єктів на поширення сигналу

Люди відіграють значну роль як фактор поглинання радіосигналів [9]. Коли радіохвилі стикаються з людськими тілами, вони можуть відчувати різний ступінь ослаблення залежно від частоти та фізичних характеристик присутніх людей. Наприклад, високочастотні сигнали, як правило, поглинаються легше, ніж низькочастотні, що може призвести до значних проблем у міському середовищі з високою щільністю населення. Характеристики поглинання людського тіла можуть створювати динамічне та складне середовище для поширення радіохвиль, що впливає на силу та якість сигналу. Розуміння цього фактора має вирішальне значення, особливо для проектування та оптимізації систем бездротового зв'язку в густонаселених районах.

Вплив транспортних засобів на передачу радіохвиль є ще одним важливим аспектом розповсюдження сигналу [1]. Як мобільні об'єкти транспортні засоби можуть як відбивати, так і поглинати радіохвилі, що змінює шлях і силу сигналів. Наприклад, великі транспортні засоби, такі як автобуси та вантажівки, можуть створювати значні перешкоди, спричиняючи багатошляхове поширення, коли сигнали проходять кілька шляхів, щоб досягти приймача. Це може призвести до перешкод і коливань якості сигналу. Крім того, матеріали, які використовуються в конструкції автомобіля, наприклад метал, можуть відбивати сигнали, що ще більше ускладнює передачу. Розуміння цих взаємодій має важливе значення для ефективного радіозв'язку, особливо в міських умовах, де схеми руху складні та мінливі.

Динамічні перешкоди в густонаселених районах створюють додаткові проблеми для поширення радіохвиль [3]. У середовищах, де переважають будівлі, дерева та інші споруди, радіохвилі повинні переміщатися по складному ландшафту, що може призвести до дифракції, розсіювання та відбиття. Ці перешкоди можуть спотворювати траєкторію радіохвиль, впливаючи на їх силу та надійність. Як наслідок, характеристики поширення радіохвиль у міських умовах можуть значно відрізнятися залежно від часу доби та руху людей і транспортних засобів. Цей динамічний характер міського середовища вимагає передових методів моделювання для точного прогнозування поведінки сигналу, гарантуючи, що системи зв'язку можуть підтримувати оптимальну продуктивність серед мінливого ландшафту.

Особливості роботи у відкритих та складних середовищах

Відстань між передавачем і приймачем відіграє вирішальну роль у поширенні радіохвиль, суттєво впливаючи на силу та якість сигналу [3]. Коли радіохвилі поширюються на великі відстані, вони стикаються з різними факторами навколишнього середовища, які можуть призвести до загасання та спотворення. Зокрема, із збільшенням відстані збільшується ймовірність перешкод, таких як будівлі, дерева та рельєф, що заважають сигналу. Це ослаблення може призвести до зменшення амплітуди сигналу, яке може бути вираженим у містах із щільною забудовою [11]. Крім того, такі фактори, як частота сигналу, що передається, і висота антен можуть суттєво вплинути на ефективну дальність зв'язку. Наприклад, хвилі нижчої частоти, як правило, дифрагують навколо перешкод ефективніше, ніж хвилі вищої частоти, забезпечуючи краще поширення в складних середовищах [1].

Природні перешкоди створюють значні проблеми для поширення радіохвиль, особливо в регіонах із різноманітною топографією [12]. Наприклад, такі явища, як заломлення та розсіювання, викликані атмосферними умовами, можуть спотворювати траєкторію радіохвиль. У середовищі з пагорбами, горами або густим листям радіосигнали можуть перекриватися або розсіюватися, що призводить до мертвих зон, де прийом слабкий або відсутній. Крім того, атмосферні умови, включаючи коливання вологості та температури, можуть ще

більше ускладнити передачу сигналу, змінюючи щільність повітря, через яке проходять хвилі [1]. Отже, системи зв'язку повинні бути розроблені з урахуванням цих природних перешкод, щоб підтримувати надійний зв'язок у таких складних умовах.

Ландшафт і рельєф місцевості також істотно впливають на поширення радіохвиль, що вимагає індивідуальних підходів для ефективної комунікації [13]. На пересіченій або нерівній місцевості радіосигнали можуть відбиватися від поверхонь, що призводить до зміни потужності та якості сигналу. Відбиття радіохвиль від поверхні Землі може призвести до багатопроменевого поширення, коли один сигнал надходить до приймача кількома шляхами, потенційно спричиняючи перешкоди та погіршення якості сигналу [4]. Щоб пом'якшити ці ефекти, системи зв'язку можуть використовувати такі методи, як стратегічне розміщення антен на підвищених місцях або використання спрямованих антен для фокусування сигналу в певних напрямках. Ця здатність до адаптації має вирішальне значення для забезпечення надійного зв'язку в районах, що характеризуються складними ландшафтами, що забезпечує краще покриття та покращує цілісність сигналу в різних умовах.

Методи моделювання впливу середовища

Використання емпіричних моделей є ключовим аспектом для передбачення втрат сигналу в різних середовищах [6]. Ці моделі базуються на експериментальних даних, які дозволяють оцінити затухання радіосигналів у типових умовах, таких як міські та міські райони. Наприклад, моделі, розроблені на основі польових вимірювань, здатні відобразити вплив об'єктів, таких як будівлі і дерева, на розповсюдження радіохвиль [2]. Індивідуальні емпіричні моделі також допомагають закономірності в затуханні сигналу, що є необхідним для планування ефективних радіомереж у різноманітних умовах.

Програмні інструменти для аналізу впливу навколишнього середовища на розповсюдження радіохвиль є масою елементом сучасного радіоінжинірингу [14]. Вони можуть моделювати різноманітні сценарії поширення сигналу, враховуючи специфіку середовища, в якому сигнал буде поширюватися. Наприклад, програми,

такі як MathCad, вибирають емпіричні моделі та чисельні методи для моделювання затухання сигналу в умовах щільної урбанізації [2]. Завдяки цим програмним засобам інженери можуть отримувати точні дані для оптимізації проектування радіомереж, що забезпечує їх ефективність та надійність.

Врахування середовища при проектуванні мережі Wi-Fi є критичним місцем для забезпечення стабільного та швидкого зв'язку [3]. В умовах щільної забудови, де радіохвилі можуть знати значних втрат, необхідно використовувати спеціалізовані моделі для прогнозування покриття мережі. Це включає в себе аналіз впливу стін, меблів та інших об'єктів на розподіл сигналу в приміщеннях [1]. Інженери повинні отримати такі фактори, як: - Висота антени - Тип використовуваних матеріалів - Наявність перешкод Ці елементи дозволяють створити більш безперебійну та ефективну мережу Wi-Fi, яка відповідає вимогам сучасних користувачів.

## 2.3. Проблеми поширення сигналу у Wi-Fi мережах

Затухання сигналу у середовищі

Відстань між точкою доступу та клієнтським пристроєм відіграє вирішальну роль у ослабленні сигналу в мережах Wi-Fi [1]. Зі збільшенням відстані потужність сигналу Wi-Fi зменшується, що призводить до потенційних проблем із підключенням. Це явище можна віднести до закону обернених квадратів, який стверджує, що інтенсивність сигналу зменшується з квадратом відстані від джерела. Наприклад, типовий домашній Інтернет-центр із точкою доступу 802.11b/g Wi-Fi має обмежений ефективний радіус дії, часто близько 30 метрів у приміщенні [1]. У багатьох випадках зони в межах зони покриття можуть демонструвати сильні сигнали, але клієнтському пристрою може бути важко підтримувати з’єднання через відстань від точки доступу, що призводить до непослідовної взаємодії з користувачем [2].

Іншим важливим фактором, що впливає на ослаблення сигналу, є поглинання сигналів будівельними матеріалами [3]. Такі звичайні матеріали, як бетон, цегла та метал, можуть значно послабити сигнали Wi-Fi, коли вони проходять через стіни та підлогу. Наприклад, бетонна стіна може знизити потужність сигналу на 30 дБ, створюючи мертві зони в структурі, де зв'язок поганий або відсутній. Крім того, щільність і товщина матеріалів, які використовуються в будівництві, можуть ще більше загострити цю проблему. Таким чином, стратегічне розташування точки доступу та мінімізація кількості перешкод між нею та клієнтським пристроєм може значно покращити загальне підключення (рис. 2.4).

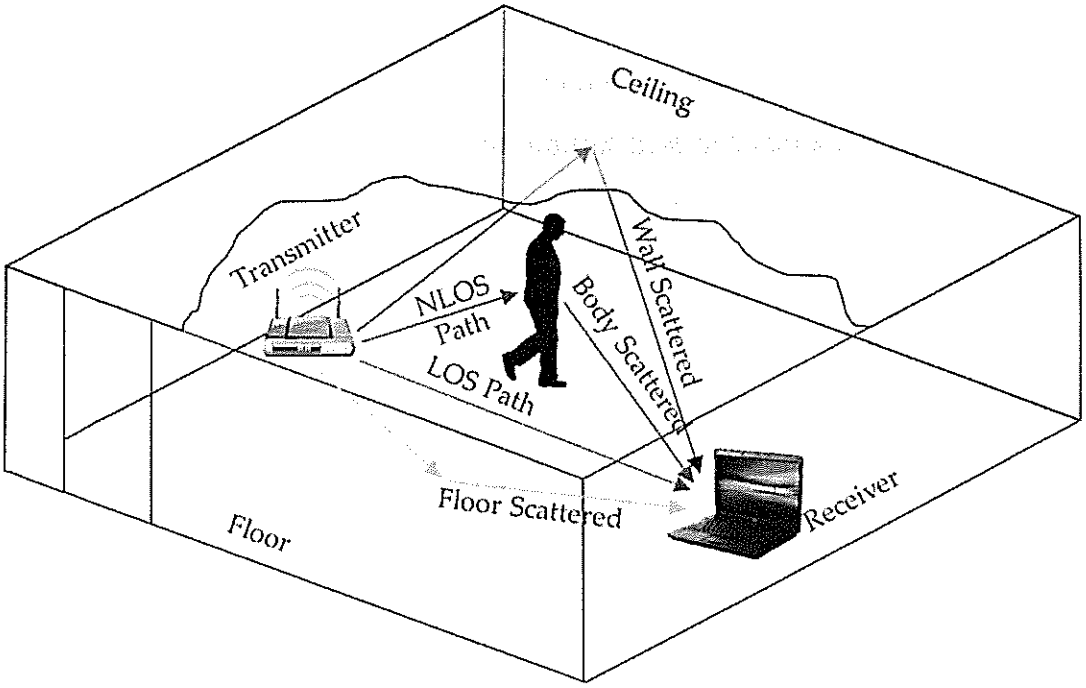



Рис. 2.4. Поширення сигналу Wi-Fi у приміщенні

Природні перешкоди, такі як дерева та водойми, також сприяють ослабленню сигналу в мережах Wi-Fi [3]. Ці елементи можуть заважати прямій видимості між точкою доступу та клієнтським пристроєм, що призводить до зниження потужності сигналу. Наприклад, густе листя може поглинати та розсіювати радіохвилі, викликаючи значне погіршення сигналу Wi-Fi. Так само вода може відбивати та заломлювати сигнали, що призводить до непередбачуваних проблем з підключенням. Щоб пом'якшити ці наслідки, користувачі можуть підняти точку

Таблиця 2.4.

Основні проблеми та рекомендації при поширенні сигналу у Wi-Fi мережах

| Проблема | Ключові фактори | Рекомендації для усунення | Оцінка серйозності (1-5) |
|---|---|---|---|
| Затухання сигналу у середовищі | Відстань, будівельні матеріали, природні перешкоди (дерева, водойми). | Оптимальне розташування точок доступу, мінімізація перешкод, підвищення висоти розміщення. | 4 - Висока |
| Інтерференція сигналів | Конкуренція між мережами, фізичні перешкоди (меблі, техніка), погодні умови. | Ручне налаштування каналів, уникнення фізичних бар'єрів, додаткові точки доступу. | 5 - Дуже висока |
| Обмежена пропускна здатність | Перевантаження точок доступу, надмірна кількість користувачів, застарілі стандарти Wi-Fi. | Розподіл навантаження між точками доступу, пріоритезація користувачів, оновлення обладнання. | 4 - Висока |
| Перешкоди у закритих приміщеннях | Металеві поверхні, щільність стін, взаємодія з побутовою технікою. | Стратегічне розташування маршрутизаторів, уникнення металевих бар'єрів, оптимізація розташування антен. | 3 - Середня |

Крім того, атмосферні умови, такі як дощ або висока вологість, можуть впливати на поширення радіохвиль, що призводить до коливань якості сигналу. У деяких випадках зовнішні мережі Wi-Fi можуть зіткнутися з проблемами через сильний дощ або сніг, що може призвести до тимчасових збоїв у з'єднанні [8].

Усвідомлення цих впливів навколишнього середовища дозволяє користувачам вживати профілактичних заходів, наприклад коригувати розташування маршрутизатора або встановлювати додаткові точки доступу, щоб підтримувати стабільне та надійне з'єднання Wi-Fi.

Обмежена пропускна здатність

Важливим фактором, що сприяє обмеженню пропускної здатності в мережах Wi-Fi, є високе навантаження на точки доступу [9]. Коли багато пристроїв підключаються до однієї точки доступу, вона може бути перевантажена, що призведе до зниження продуктивності та повільної швидкості з'єднання. Така ситуація часто виникає в густонаселених районах, таких як житлові комплекси, де кілька користувачів змагаються за пропускну здатність одночасно [4]. Як наслідок, загальна робота мережі погіршується, викликаючи неприємні затримки та перебої. Щоб пом'якшити цю проблему, мережеві адміністратори можуть розглянути можливість балансування навантаження між кількома точками доступу, забезпечуючи більш справедливий розподіл доступної пропускної здатності.

Присутність занадто великої кількості користувачів у мережі може призвести до значного зниження швидкості передачі даних [10]. Коли мережа Wi-Fi насичена підключеними пристроями, доступну пропускну здатність потрібно розділити між усіма користувачами, у результаті чого кожен користувач отримує частку від загальної швидкості. Це явище може бути особливо проблематичним під час пікового використання, коли багато пристроїв транслюють відео, завантажують файли або займаються іншою діяльністю, яка потребує великих даних. Таким чином, розуміння користувацьких можливостей кожної точки доступу та впровадження таких стратегій, як пріоритезація користувачів або політик часу використання, може допомогти підтримувати прийнятні рівні продуктивності для всіх підключених.

Іншою важливою проблемою, яка впливає на пропускну здатність Wi-Fi, є використання застарілих стандартів Wi-Fi [11]. Багато старіших пристроїв працюють на менш ефективних протоколах, таких як 802.11b або 802.11g, які не можуть підтримувати вищі швидкості передачі даних, передбачені сучасними

стандартами, такими як 802.11ac або 802.11ax. Ці старіші стандарти не тільки мають нижчу максимальну швидкість, але й демонструють нижчу продуктивність у середовищах із високою щільністю, де переважають перешкоди від інших пристроїв [12]. Оновлення до нових пристроїв, які відповідають поточним стандартам, може значно підвищити продуктивність мережі та зменшити перевантаження, дозволяючи користувачам повною мірою використовувати доступну пропускну здатність у своїх мережах Wi-Fi (рис. 2.5).

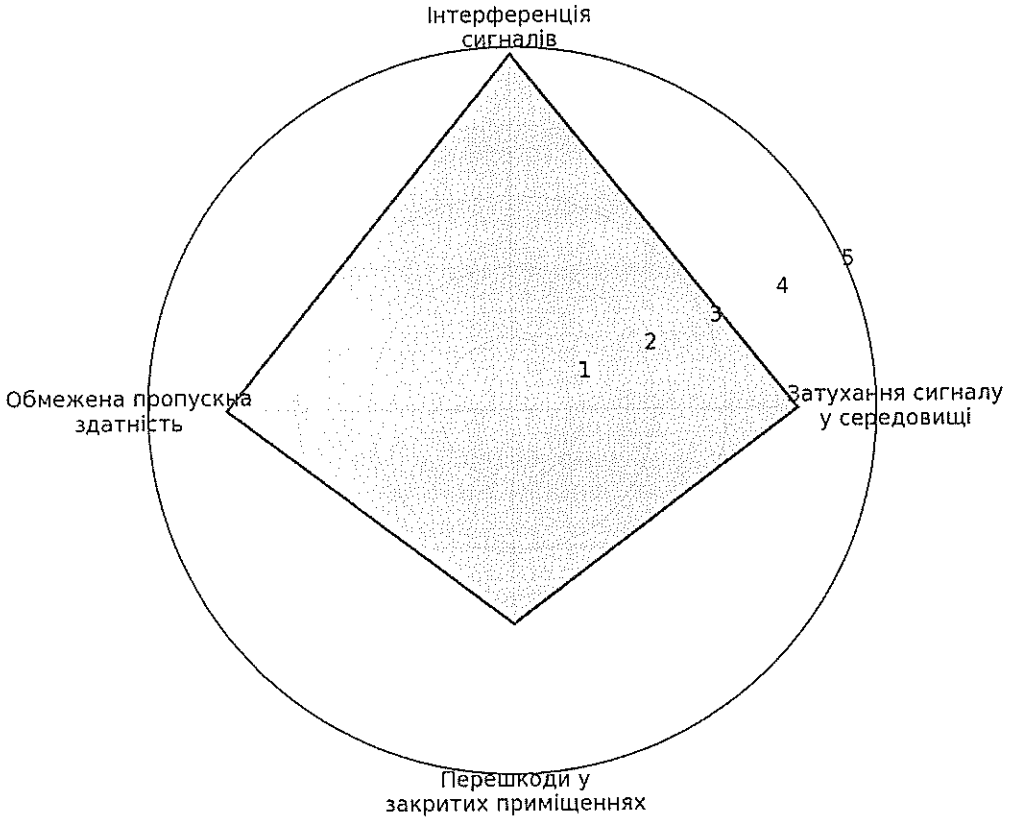



Рис. 2.5. Діаграма рівня впливу пеершкод у Wi-Fi мережах

Проблеми багатоканального доступу

Однією з основних проблем багатоканального доступу в мережах Wi-Fi є обмежена кількість доступних каналів [1]. У діапазоні частот 2,4 ГГц користувачі мають доступ лише до 11 або 13 каналів, залежно від регіону, що може призвести до перевантажень і перешкод [1]. Це обмеження є особливо проблематичним у середовищах, де декілька бездротових мереж працюють одночасно, оскільки обмежена кількість каналів може швидко насичуватися. Обмежена доступність

каналів може призвести до уповільнення мережі, збільшення затримки та проблем з підключенням, особливо в густонаселених районах, де багато користувачів намагаються спільно використовувати ті самі обмежені канали.

Перекриття каналів створює ще одну серйозну проблему в густонаселених районах [3]. У міських умовах або житлових комплексах мережі Wi-Fi можуть заважати одна одній через перекривання каналів. Коли кілька мереж налаштовано на використання однакових або суміжних каналів, вони можуть створювати значну кількість перешкод, що призводить до погіршення продуктивності всіх залучених пристроїв. Наприклад, часто рекомендуються канали 1, 6 і 11 у діапазоні 2,4 ГГц, оскільки вони не перекриваються; однак багато користувачів можуть ненавмисно вибрати той самий канал, посилюючи проблему. Як наслідок, користувачі можуть зіткнутися з низькою швидкістю, розривом з'єднань і загальним зниженням надійності мережі.

Неправильна конфігурація каналу може призвести до значної втрати продуктивності в мережах Wi-Fi [13]. Багато користувачів налаштовують свої маршрутизатори на автоматичний вибір каналу, який не завжди може вибрати оптимальний канал для продуктивності. Якщо пристрої підключено до перевантажених каналів, результатом може бути низька швидкість передачі даних і збільшення перешкод від сусідніх мереж. Крім того, недостатня обізнаність щодо правильного розміщення маршрутизатора може ще більше посилити ці проблеми, оскільки фізичні бар'єри та неправильне розташування можуть зменшити силу сигналу. Тому ручний вибір відповідних каналів і забезпечення оптимального розташування маршрутизатора є ключовими кроками для підвищення продуктивності мережі та мінімізації втрати продуктивності.

Перешкоди у закритих приміщеннях

Металеві поверхні всередині приміщень можуть значно перешкоджати поширенню сигналу Wi-Fi, відбиваючи або блокуючи сигнал [14]. Звичайні металеві перешкоди включають стіни, укріплені металевими елементами, металеві двері та навіть меблі з металевими компонентами. Ці матеріали є особливо проблематичними, оскільки вони можуть порушувати шлях радіохвиль,

ускладнюючи ефективне досягнення сигналом Wi-Fi пристроїв (рис. 2.6). Наприклад, стіна, яка містить метал, може не тільки перешкоджати сигналу, але й відбивати його, спричиняючи непередбачувану продуктивність у різних частинах кімнати [15]. Це втручання може призвести до зниження швидкості Інтернету та розриву з'єднань, що впливає на загальну взаємодію з користувачем.

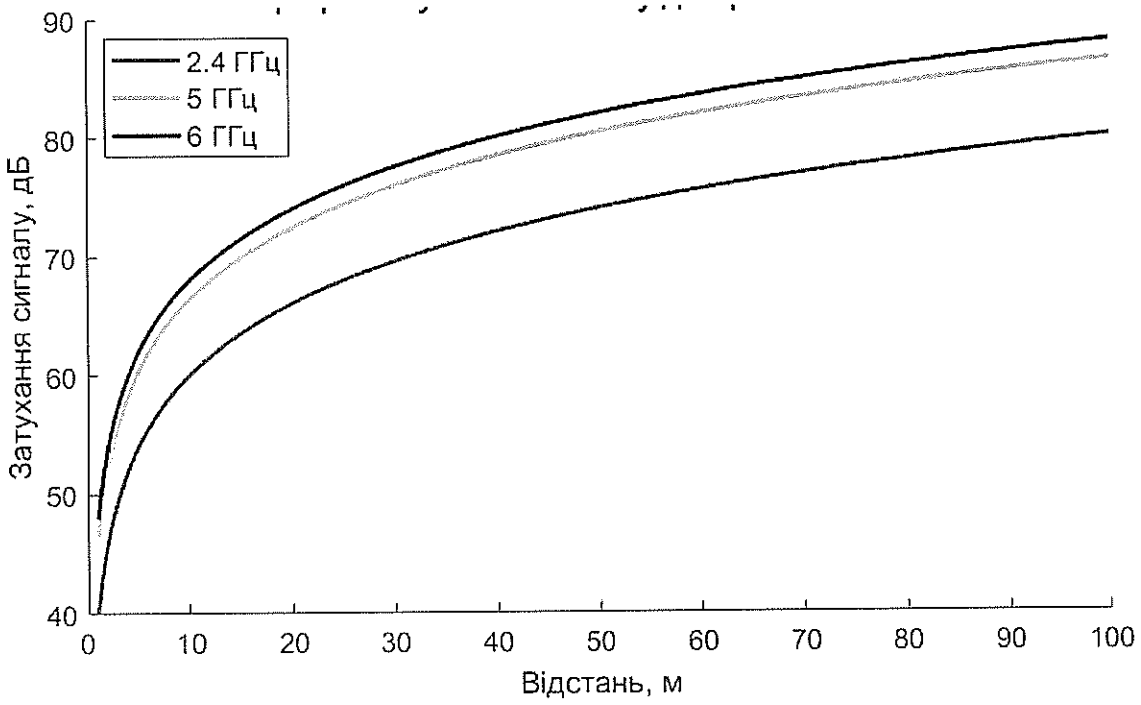



Рис. 2.6. Графік затухання сигналу для різних частот

Окрім металевих поверхонь, висока щільність стін і перегородок у будівлі може ускладнити поширення сигналу Wi-Fi [16]. Різні конструкційні матеріали по-різному впливають на силу сигналу; наприклад, залізобетонні стіни більше пригнічують сигнали, ніж гіпсокартонні перегородки [17]. Коли сигнали Wi-Fi проходять через ці матеріали, вони втрачають силу, що може призвести до мертвих зон у просторі. Крім того, розташування цих стін може створювати численні бар'єри, через які сигнал повинен проходити, що ускладнює підтримку стабільного з'єднання для пристроїв, розташованих далеко від маршрутизатора. Розуміння складу матеріалів і планування будівлі має вирішальне значення для оптимізації продуктивності Wi-Fi.

Побутова техніка також створює перешкоди для сигналу Wi-Fi, особливо пристрої, які працюють на аналогічних діапазонах частот [18]. Наприклад, мікрохвильові печі, які зазвичай працюють на частоті 2,4 ГГц, можуть порушувати сигнали Wi-Fi під час використання [19]. Крім того, телефони DECT та інші бездротові гаджети можуть створювати шум, який ще більше погіршує якість сигналу [20]. Сукупний ефект цих пристроїв може призвести до зниження зв'язку та зниження швидкості, особливо в домівках, де одночасно використовується кілька пристроїв. Поінформованість про ці потенційні джерела перешкод є важливою для користувачів, які прагнуть підвищити надійність і продуктивність своєї мережі Wi-Fi.

Проблеми безпеки сигналу

Однією з основних проблем безпеки в мережах Wi-Fi є загроза перехоплення даних через слабкі методи шифрування [21]. Найпоширеніший стандарт шифрування, WEP, має уразливості, якими можна скористатися, навіть якщо його правильно налаштовано, головним чином через його властиві недоліки [22]. Це дозволяє зловмисникам легко перехоплювати дані, що передаються через мережу, що призводить до несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації. Такі порушення можуть призвести до значних наслідків, включаючи крадіжку особистих даних і розголошення конфіденційного спілкування. Щоб пом'якшити ці ризики, користувачам важливо прийняти більш надійні стандарти шифрування, такі як WPA2 або WPA3, які забезпечують кращий захист від прослуховування та перехоплення даних.

Іншою критичною проблемою є вразливість мереж Wi-Fi до атак типу «відмова в обслуговуванні» (DoS) [21]. Зловмисники можуть порушити роботу мережевих служб, перевантажуючи точки доступу надмірними запитами або ініціюючи небажані перезавантаження системи, роблячи мережу непридатною для використання законними користувачами [23]. Такі атаки можуть паралізувати не лише окремі пристрої, а й цілі мережі, що призводить до значних простоїв і втрати продуктивності. Організації повинні впроваджувати надійні заходи безпеки, включаючи системи виявлення вторгнень і інструменти моніторингу мережі, щоб

своєчасно виявляти такі атаки та реагувати на них, таким чином мінімізуючи їхній вплив на доступність мережі та досвід користувача.

Наявність незахищених точок доступу у відкритих мережах створює значну загрозу безпеці сигналу [21]. Ці мережі, які часто можна знайти в громадських місцях, таких як кафе та аеропорти, можуть бути легко використані зловмисниками, які прагнуть перехопити дані або здійснити атаки. Користувачі, які підключаються до цих мереж, можуть ненавмисно відкрити свою особисту інформацію, оскільки відсутність шифрування полегшує зловмисникам підслуховування комунікацій [24]. Для підвищення безпеки користувачам важливо бути обережними під час доступу до відкритих мереж. Такі стратегії, як використання віртуальних приватних мереж (VPN) і уникнення конфіденційних транзакцій у незахищених середовищах, можуть допомогти захиститися від цих вразливостей.

Обмеження у високошвидкісних сценаріях

Коли клієнти швидко рухаються, наприклад, у транспортних сценаріях, продуктивність мереж Wi-Fi може значно погіршитися [25]. Високошвидкісний рух може порушити стабільність з'єднання, що призведе до збільшення затримки та втрати пакетів. Це особливо проблематично в таких середовищах, як потяги чи автобуси, де користувачі очікують безперебійного підключення. Зі збільшенням швидкості клієнтського пристрою зростає ймовірність погіршення сигналу, що ускладнює підтримку надійного з'єднання. Крім того, швидке переміщення може спричинити часте перемикання пристрою між точками доступу, що може ще більше ускладнити якість з'єднання. Це явище підкреслює важливість оптимізації мереж Wi-Fi для високошвидкісних сценаріїв, гарантуючи, що користувачі відчуватимуть мінімальні збої навіть у дорозі.

Проблема забезпечення стабільного з'єднання в громадських місцях є ще одним суттєвим обмеженням у сценаріях високошвидкісного Wi-Fi [26]. У таких місцях, як аеропорти, кафе та торгові центри, часто є висока щільність користувачів, що може призвести до перевантаження мережі. Наявність кількох пристроїв, які змагаються за обмежену пропускну здатність, може призвести до

зниження швидкості та ненадійного з'єднання. Крім того, перешкоди від інших електронних пристроїв, таких як обладнання Bluetooth і сусідні мережі Wi-Fi, можуть посилити ці проблеми [25]. У таких середовищах забезпечення оптимального розміщення та конфігурації маршрутизатора стає вирішальним для зменшення втрати сигналу та покращення зв'язку для всіх користувачів. Без ретельного планування користувацький досвід може серйозно погіршитися в цих переповнених місцях.

# РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ WI-FI МЕРЕЖ

## 3.1. Методи підвищення ефективності роботи перспективних безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль

Multi-Link Operation (MLO) — це інноваційний підхід у Wi-Fi 7, який використовує принципи багатоканальних з'єднань для підвищення продуктивності мережі. Встановлюючи декілька одночасних з'єднань у різних діапазонах частот, MLO дозволяє пристроям передавати й отримувати дані більш ефективно [1]. Цей метод працює за принципом, згідно з яким об'єднання кількох посилань може призвести до покращення пропускної здатності та зменшення затримки. Наприклад, коли пристрій одночасно підключається до діапазонів 2,4 ГГц і 5 ГГц, він може розподілити навантаження даних, сприяючи швидшому та надійнішому зв'язку. Цей метод не тільки оптимізує використання доступного спектру, але й пом'якшує вплив перешкод, тим самим покращуючи загальний досвід користувача в середовищах із високим попитом.

Однією з головних переваг одночасного використання кількох діапазонів частот є значне підвищення швидкості передачі даних і надійності мережі [2]. Використовуючи як низькочастотні, так і високочастотні діапазони, користувачі можуть скористатися перевагами кожного з них. Низькочастотні діапазони, наприклад 2,4 ГГц, пропонують більше покриття та проникнення через перешкоди, тоді як вищі частоти, наприклад 5 ГГц, забезпечують вищу швидкість передачі даних. Таке одночасне використання забезпечує більш надійне з'єднання, особливо в середовищах із високими вимогами до пропускної здатності, таких як потокове відео високої чіткості або онлайн-ігри. Крім того, використання кількох діапазонів допомагає зменшити перевантаження, гарантуючи, що користувачі відчуватимуть мінімальні збої та покращену продуктивність під час пікового використання.

Вибір оптимальних каналів має вирішальне значення для підвищення надійності багатоканальних операцій у мережах Wi-Fi [3]. Стратегічно вибираючи

менш перевантажені канали, користувачі можуть значно зменшити перешкоди та підвищити стабільність з'єднання. Завдяки розвитку технологій пристрої тепер можуть автоматично сканувати найкращі доступні канали, адаптуючись до мінливих умов мережі в реальному часі. Цей адаптивний процес вибору каналу не тільки покращує продуктивність MLO, але й гарантує, що пристрій підтримує міцне з'єднання навіть у складних умовах. Крім того, це дозволяє краще розподіляти мережевий трафік, таким чином максимізуючи потенціал кожного діапазону частот і сприяючи більш ефективній бездротовій мережі в цілому.

Розширення ширини каналів

Wi-Fi 7 представляє значний прогрес у бездротовій технології з підтримкою ширини каналу до 320 МГц [4] (табл. 3.1). Це збільшення дозволяє одночасно передавати більш значний обсяг даних, що призводить до покращення продуктивності мережі. Можливість використовувати ширші канали є особливо корисною в середовищах із високою щільністю користувачів, оскільки це дозволяє мережі об'єднувати більше пристроїв без шкоди для швидкості та надійності. Крім того, перехід до більш широких каналів узгоджується із загальною метою збільшення пропускної здатності в мережах Wi-Fi, про що свідчать дослідження, які підкреслюють подвоєння пропускної здатності, коли ширина каналу розширюється до 160 МГц [5]. Ця можливість знаменує собою ключову зміну в бездротовому зв'язку, дозволяючи більш ефективно використовувати доступну пропускну здатність.

Реалізація розширеної ширини каналу безпосередньо впливає на загальну пропускну здатність і пропускну здатність мереж Wi-Fi [1]. Завдяки розширенню каналів технологія Wi-Fi 7 підвищує швидкість передачі даних, що може бути досягнуто, таким чином підтримуючи більшу кількість одночасних підключень без погіршення продуктивності. Наприклад, мережі, що працюють за стандартом 802.11ax, можуть ефективно обслуговувати більше користувачів, використовуючи ці розширені канали, що має вирішальне значення в густонаселених районах, таких як офіси та громадські місця [1]. Збільшена пропускна здатність не тільки підтримує більш високу швидкість передачі даних, але й забезпечує більш

стабільне з'єднання, що важливо для додатків, які потребують великої пропускної здатності, таких як потокове передавання та онлайн-ігри.

Таблиця 3.1.

Числові дані для методів покращення Wi-Fi 7

| Метод | Покращення пропускної здатності, % | Зниження затримок, % | Ефективність використання спектра, % |
|---|---|---|---|
| Мультиканальна робота (MLO) | 50 | 30 | 40 |
| Розширення ширини каналів (320 МГц) | 100 | 20 | 50 |
| Високий порядок модуляції (4096-QAM) | 20 | 10 | 30 |
| Розширена підтримка MU-MIMO (16 просторових потоків) | 40 | 25 | 35 |
| Адаптивне «вирізання» преамбули | 15 | 20 | 45 |
| Покращення технології OFDMA | 30 | 15 | 50 |

Ефективне використання доступного спектру має першочергове значення для максимізації продуктивності мереж Wi-Fi 7 [4]. Із розширенням ширини каналів стає важливим ефективне керування спектром, щоб уникнути перешкод і

оптимізувати якість сигналу. Такі методи, як динамічний розподіл каналів і спільне використання спектру, можна використовувати, щоб гарантувати, що доступна смуга пропускання використовується в повній мірі. Крім того, оскільки попит на бездротове підключення продовжує зростати, використання передових алгоритмів для керування спектром ставатиме все більш важливим. Розставляючи пріоритети каналів на основі поточних шаблонів використання та вимог до пристроїв, мережі можуть підвищити свою загальну ефективність і забезпечити чудову взаємодію з користувачем, що зрештою прокладає шлях до бездротового зв'язку в майбутньому.

Високий порядок модуляції (4096-QAM)

Основи роботи з модулем 4096-QAM є ключовими для розуміння її впливу на ефективність бездротових технологій Wi-Fi 7. Ця модуляція є розширенням попередніх форм, таких як 256-QAM, і дозволяє передавати дані з більшою щільністю за рахунок використання 12 біт на символ [3]. ]. Вона забезпечує вищу швидкість передачі даних, що особливо важливо в умовах зростання потреб у швидкості та ефективності мережі Wi-Fi. Модуляція 4096-QAM забезпечує можливість передачі більшої кількості інформації за один і той же проміжок часу, що призводить до зменшення витрат і підвищення загальної продуктивності мережі.

Переваги високої спектральної ефективності, що забезпечує 4096-QAM, очевидні в контексті сучасних вимог до бездротових мереж [4]. Висока щільність модуляції дозволяє досягти значних швидкостей передачі даних, що є критично важливим для виробництва, які вимагають великої пропускної здатності, таких як потокове відео високої чіткості або віртуальної реальності. Завдяки цьому використання 4096-QAM може значно підвищити ефективність використання доступного спектру, зменшуючи споживання в додаткових каналах та знижуючи енергоспоживання. Це створює можливості для більш ефективної роботи мережі, а також для зменшення витрат на інфраструктуру.

Однак, незважаючи на всі переваги, використання 4096-QAM має свої обмеження в складних умовах сигналу [6]. Висока чутливість до шуму та завад

може призвести до зниження якості зв'язку, особливо в умовах з низьким рівнем сигналу або в щільно населених районах. При наявності перешкод значно знижується ефективність 4096-QAM, що можна призвести до підвищення ймовірності помилок при передачі даних. Це вимагає врахування особливостей середовища, в якому буде використовуватися даний метод модуляції, що може обмежити його застосування в певних ситуаціях або вимагати використання додаткових технологій для покращення належної роботи (рис. 3.1).

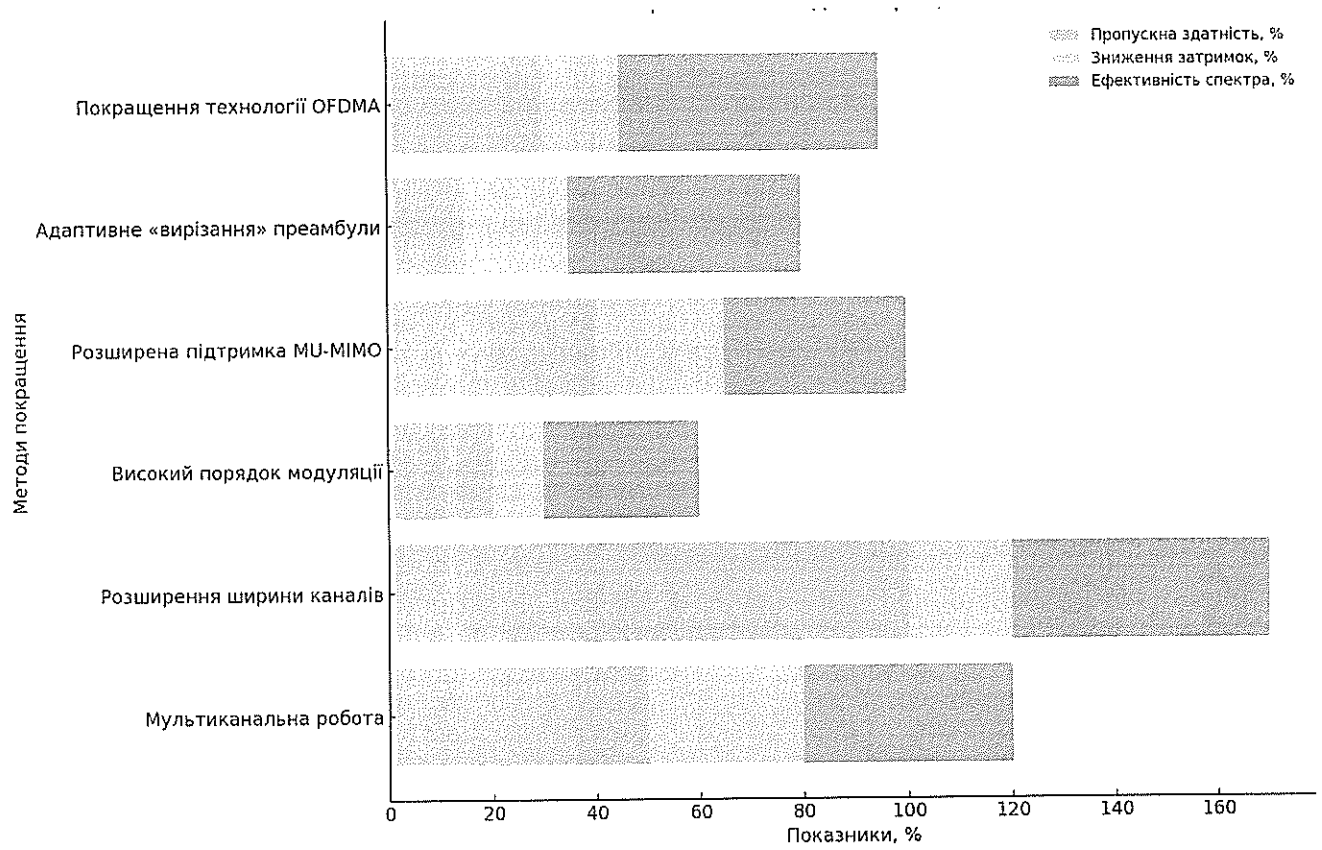



Рис. 3.1. Порівняння методів покращення Wi-Fi 7 відносно Wi-Fi 6

Розширена підтримка MU-MIMO

Одним із ключових досягнень у технології Wi-Fi 7 є підтримка до 16 просторових потоків, що значно підвищує пропускну здатність та ефективність бездротових мереж [7]. Ця розширена можливість дозволяє одночасно передавати кілька потоків даних, оптимізуючи використання пропускної здатності та дозволяючи підключатися більшій кількості пристроїв без зниження продуктивності. Збільшення порівняно з попередніми стандартами, які зазвичай

підтримували до 8 просторових потоків, знаменує значне покращення загальної ефективності мережі та взаємодії з користувачем [1]. Завдяки цьому вдосконаленню користувачі можуть розраховувати на вищу швидкість передачі даних і покращену якість обслуговування, особливо в середовищах із високою щільністю підключених пристроїв.

Одночасна передача даних на кілька пристроїв є ще однією важливою особливістю технології MU-MIMO в Wi-Fi 7 [1]. На відміну від традиційних технологій Wi-Fi, які зазвичай підтримують передачу даних для одного користувача, MU-MIMO дозволяє одночасно спілкуватися з декількома пристроями, ефективно керуючи доступною смугою пропускання. Ця можливість особливо корисна в місцях скупчення людей, де кілька користувачів можуть одночасно транслювати, грати або проводити відеодзвінки. Спрощуючи доставку потоків даних декільком клієнтам одночасно, MU-MIMO не тільки покращує взаємодію з користувачем, але й оптимізує загальну продуктивність мережі, зменшуючи перевантаження та покращуючи швидкість реагування в програмах реального часу [4].

Значною перевагою підтримки MU-MIMO Wi-Fi 7 є її здатність зменшувати затримку в густонаселених мережах [1]. У сценаріях, коли багато пристроїв активно передають і отримують дані, традиційні налаштування мережі можуть мати затримки через перешкоди сигналу та боротьбу за пропускну здатність. Завдяки впровадженню MU-MIMO технологія дозволяє більш ефективно використовувати доступні канали, таким чином зменшуючи час, потрібний пристроям для доступу до мережі та передачі даних. Це зменшення затримки особливо важливо для додатків, які вимагають спілкування в режимі реального часу, таких як онлайн-ігри та відеоконференції, гарантуючи безперебійну роботу користувачів навіть у середовищах із високим попитом.

Адаптивне «вирізання» преамбули (Preamble Puncturing)

Адаптивне «вирізання» преамбули (Preamble Puncturing) — це технологія, яка дозволяє Wi-Fi пристроям використовувати лише ті частини спектра, які вільні від

перешкод. Якщо частина каналу зайнята або має завади, решта каналу залишається доступною для передачі даних.

Однією з ключових переваг адаптивного виколювання преамбули в технологіях Wi-Fi 7 є можливість використовувати частини спектру, вільні від перешкод [8]. Вибірково пропускаючи розділи преамбули під час передачі даних, мережі Wi-Fi можуть ефективніше використовувати доступну пропускну здатність. Цей метод дозволяє передавати пакети даних без перешкод через шум або інші бездротові сигнали, які можуть бути присутніми в навколишньому середовищі. Відповідно, мережа може досягти вищої швидкості передачі даних і зменшити затримку. Здатність використовувати чисті сегменти спектру допомагає підтримувати стабільне з'єднання, особливо в місцях скупчення людей, де кілька пристроїв змагаються за однакові частотні канали.

Динамічна адаптація каналів до умов навколишнього середовища є ще одним важливим аспектом підвищення ефективності Wi-Fi 7 [4]. Це передбачає використання методів когнітивного радіо, які дозволяють мережі оцінювати навколишнє середовище та відповідно коригувати параметри роботи. Наприклад, якщо певні канали відчувають перешкоди або перевантаження, мережа може плавно переключитися на альтернативні, менш завантажені канали. Ця адаптивність не тільки покращує загальну взаємодію з користувачем, мінімізуючи збої, але й оптимізує продуктивність мережі за різних умов. Це гарантує, що доступний спектр використовується найбільш ефективно, що призводить до покращеного підключення для всіх користувачів.

Збільшення пропускної здатності в складних умовах має вирішальне значення для підтримки високої продуктивності технологій Wi-Fi 7 [9]. Застосовуючи передові технології, такі як Multiple Input Multiple Output (MIMO) і оптимальні алгоритми, мережі Wi-Fi можуть значно розширити свої можливості передачі даних. Ці методи дозволяють мережі використовувати кілька просторових потоків, тим самим збільшуючи загальну пропускну здатність навіть у складних сценаріях, де може статися погіршення сигналу. Поєднання адаптивного виколювання преамбули та динамічної адаптації каналу додатково зміцнює

здатність мережі справлятися з перешкодами, створюючи більш надійне та ефективне бездротове середовище зв'язку, яке може підтримувати більшу кількість підключених пристроїв одночасно.

Покращення технології OFDMA

Одним із ключових методів підвищення ефективності технології множинного доступу з ортогональним частотним розподілом (OFDMA) у Wi-Fi 7 є реалізація більш гнучкого розподілу блоків ресурсів [1]. Ця гнучкість дозволяє динамічно налаштовувати блоки ресурсів на основі умов мережі в реальному часі, що може оптимізувати використання пропускної здатності. Дозволяючи мережі більш ефективно розподіляти ресурси, користувачі можуть відчути покращену швидкість передачі даних, зменшену затримку та кращу загальну продуктивність. Ця адаптивність особливо корисна в середовищах із різними вимогами користувачів і можливостями пристроїв, гарантуючи, що найважливіші програми отримають необхідну пропускну здатність. У результаті мережа може включати різноманітні пристрої та сервіси, починаючи від потокового відео високої чіткості й закінчуючи додатками Інтернету речей, без шкоди для продуктивності чи досвіду користувача [3].

Підтримка різноманітних типів трафіку є ще одним важливим аспектом удосконалення технології OFDMA у Wi-Fi 7 [4]. Можливість керувати різними типами трафіку, таким як голос, відео та дані, дозволяє оптимізувати продуктивність відповідно до конкретних потреб кожної програми. Наприклад, для голосового та відеотрафіку можна встановити пріоритет, щоб забезпечити низьку затримку та мінімальне тремтіння, що є важливим для підтримки якості під час спілкування. Навпаки, трафік даних можна запланувати в період непікової навантаження або виділити менше ресурсів, коли виникає перевантаження мережі. Таке управління трафіком не тільки покращує роботу користувача, але й максимізує ефективність мережі, забезпечуючи ефективне використання ресурсів відповідно до потреб різних додатків у реальному часі [10].

Переваги обробки багатопотокових з'єднань у Wi-Fi 7 представляють значні покращення в обробці одночасних з'єднань [1]. Завдяки збільшенню кількості

просторових потоків з 8 до 16, Wi-Fi 7 фактично подвоює теоретичну фізичну швидкість передачі даних порівняно зі своїм попередником, Wi-Fi 6 [11]. Ця можливість дозволяє мережі підтримувати більше пристроїв одночасно без шкоди для швидкості чи надійності. Крім того, розширена здатність керувати декількома потоками одночасно означає, що користувачі можуть насолоджуватися безперебійним підключенням навіть у середовищах з високою щільністю, таких як офіси, стадіони та громадські місця. Отже, покращена обробка багатопоточних з'єднань не тільки підвищує задоволеність користувачів, але й сприяє загальній надійності мережі Wi-Fi, роблячи її більш стійкою до перешкод і перевантажень [3].

### 3.2. Оцінка ефективності результатів моделювання методів

Архітектура симулятора NS-3 забезпечує високу гнучкість та можливість виконання численних симуляційних процесів одночасно [1]. Основною перевагою цієї архітектури є її модульність, яка дозволяє користувачам додавати нові модулі або змінювати існуючі без значних зусиль. Це створює умови для розробки та тестування нових протоколів зв'язку, а також для моделювання складних систем передачі даних. Функціональні можливості NS-3 включають широкий спектр підтримуваних протоколів, які дозволяють моделювати різні сценарії у сфері телекомунікацій, а також інтеграцію з іншими системами для більш детального аналізу.

Модулі NS-3 виконують ключову роль у симуляційному моделюванні, після чого кожен модуль призначений для виконання спеціальних функцій [1]. Наприклад, модулі, які відповідають за передачу даних, можуть обробляти інші протоколи, наприклад TCP або UDP, тоді як інші модулі можуть бути використані для моделювання фізичних середовищ або умов радіоочікування. Це забезпечує точність і реалістичність симуляцій, які можуть включати в себе: - Модулі для роботи з радіочастотами - Модулі для управління трафіком - Модулі для аналізу

продуктивності мережі Завдяки такій структурі користувачі можуть створювати комплексні моделі, адаптуючи їх до конкретних потреб дослідження.

Серед основних недоліків можна виділити велику кількість припущень, на яких базуються моделювання, що може зменшити точність результатів. Крім того, складність налаштування та використання симулятора може стати перешкодою для новачків у сфері моделювання. Інші обмеження включають: - Можливість глибоких знань у програмуванні для ефективного використання - Можливі проблеми з інтеграцією з іншими програмними та апаратними засобами Ці недоліки можуть бути невдалими при виборі NS-3 для досліджень в галузі моделювання радіохвиль.

Вибір частотного діапазону 6 ГГц для досліджень поширення радіохвиль пропонує кілька переваг, які роблять його привабливим варіантом для дослідників і практиків у сфері телекомунікацій [2]. Однією з основних переваг є зменшення перевантаження в цьому діапазоні, оскільки багато існуючих бездротових технологій працюють на нижчих частотах. Ця доступність забезпечує чіткіші канали та менше перешкод, що є вирішальним для підтримки високоякісних сигналів. Крім того, діапазон 6 ГГц підтримує більшу смугу пропускання, що забезпечує більш високу швидкість передачі даних (табл. 3.2). Це особливо важливо в контексті стрімкого зростання попиту на послуги передачі даних, де швидкість і надійність є найважливішими. Таким чином, використання діапазону 6 ГГц може підвищити загальну продуктивність системи, забезпечуючи кращу якість сигналу та ємність.

Таблиця 3.2.

Параметри моделювання

| Параметр | Значення |
|---|---|
| Сценарій | Закрита будівля |
| Частота | 6 ГГц |
| Передаюча потужність | 16 дБм |
| Висота антени | 1,5 м |
| Початкова відстань | 1,5 м |
| Кінцева відстань | 20 м |

Підтримка стандарту IEEE 802.11ad є ще одним важливим фактором, який підвищує привабливість частотного діапазону 6 ГГц [3]. Цей стандарт, який забезпечує високошвидкісний бездротовий зв'язок, призначений для забезпечення швидкості передачі даних до 7 Гбіт/с у діапазоні частот 60 ГГц. Прийняття стандарту 802.11ad має наслідки для діапазону 6 ГГц, оскільки відкриває шлях для прогресу в бездротових мережах із підтримкою мультигігабітного зв'язку. Здатність підтримувати високі швидкості передачі даних особливо корисна для додатків, які вимагають низької затримки, таких як віртуальна реальність і потокове відео високої чіткості. Отже, інтеграція IEEE 802.11ad із діапазоном 6 ГГц не тільки підвищує ефективність мережі, але й покращує роботу користувачів на різних пристроях і програмах.

У магістерській роботі виконано моделювання характеристик розповсюдження радіохвиль в зовнішніх умовах для технології Wi-Fi 7 (рис. 3.2, рис. 3.3).

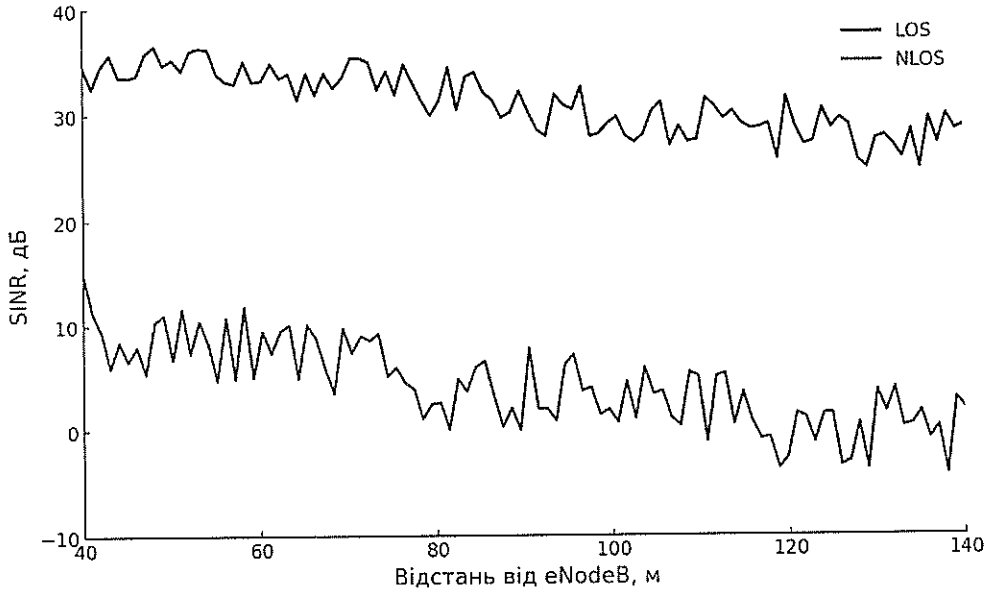



Рис. 3.2. Середнє значення SINR

LOS (Line of Sight) – Пряма видимість. Це тип радіозв'язку, коли між передавачем і приймачем немає фізичних перешкод, і сигнал поширюється прямо.

LOS забезпечує найкращу якість зв'язку завдяки мінімальному затуханню та інтерференції.

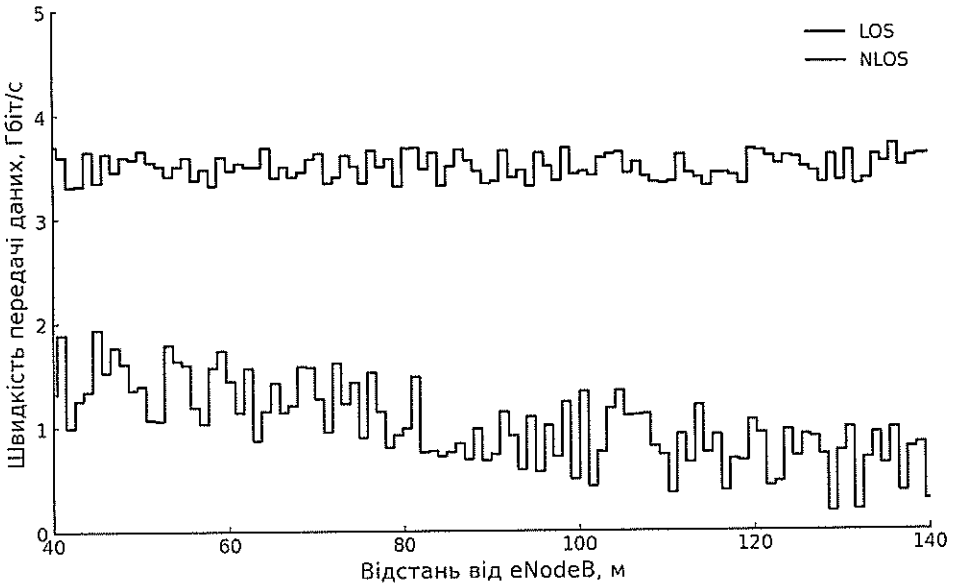



Рис. 3.3. Швидкість передачі даних користувача у сценарії LOS та NLOS

NLOS (Non-Line of Sight) – Непряма видимість. Це тип радіозв'язку, коли між передавачем і приймачем є перешкоди (наприклад, будівлі, дерева чи стіни), які блокують прямий шлях сигналу. У таких випадках сигнал поширюється через відбиття, дифракцію або заломлення, що може погіршити якість зв'язку.

Порівняння з реальними вимірюваннями підтвердило достовірність моделювання, незважаючи на певні обмеження імітаційної моделі, яка була розроблена для LTE-сценаріїв. Отримані дані можуть бути використані для подальшого покращення Wi-Fi мереж у різних умовах експлуатації.

При порівнянні діапазону частот 6 ГГц з іншими діапазонами його унікальні характеристики стають ще більш очевидними [2]. Наприклад, традиційні діапазони, такі як 2,4 ГГц і 5 ГГц, часто переповнені, що призводить до перешкод і зниження продуктивності. Навпаки, діапазон 6 ГГц менш заповнений, що значно зменшує ці проблеми. Крім того, вищі частоти, такі як 60 ГГц, можуть забезпечити дуже високу швидкість передачі даних, але страждають від обмеженого діапазону та проникнення через перешкоди. Діапазон 6 ГГц забезпечує баланс між покриттям

і швидкістю, що робить його ідеальним вибором для різноманітних програм. Таким чином, переваги діапазону 6 ГГц, зокрема з точки зору зменшення перешкод і підтримки передових стандартів, вигідно позиціонують його на тлі інших діапазонів частот у ландшафті досліджень поширення радіохвиль.

У магістерській роботі виконано моделювання характеристик розповсюдження радіохвиль в умовах закритої будівлі Wi-Fi 7.

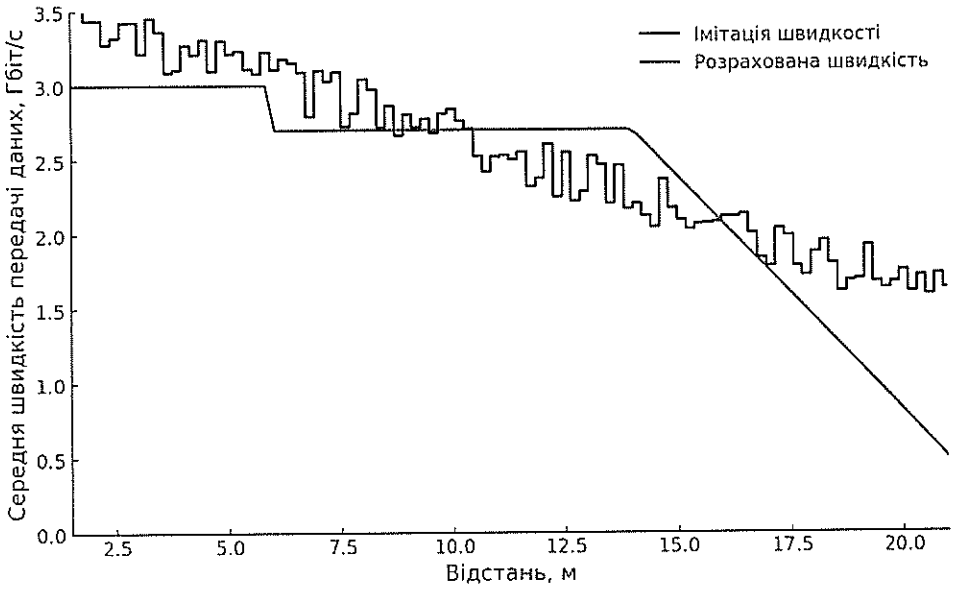



Рис. 3.4. Моделювання характеристик розповсюдження радіохвиль в умовах закритої будівлі

Порівняння з реальними вимірюваннями підтвердило достовірність моделювання, незважаючи на певні обмеження імітаційної моделі, яка була розроблена для LTE-сценаріїв. Отримані дані можуть бути використані для подальшого покращення Wi-Fi мереж у різних умовах експлуатації.

# ВИСНОВКИ

**У першому розділі** проаналізовано етапи розвитку стандартів Wi-Fi, починаючи від IEEE 802.11 і до сучасних версій, таких як Wi-Fi 6E та Wi-Fi 7. Визначено, що ключовими досягненнями є підвищення швидкості передачі даних, розширення частотних діапазонів та впровадження нових технологій, зокрема MU-MIMO та OFDMA. Це дозволяє забезпечити кращу продуктивність і стабільність у високонавантажених мережах.

Розглянуто основні елементи архітектури Wi-Fi, такі як точки доступу, маршрутизатори, клієнтські пристрої та контролери. Визначено, що правильна організація архітектури мережі впливає на стабільність та якість з'єднання. Також акцентовано увагу на важливості керуючих систем і механізмів безпеки для підтримання надійності та безперебійної роботи мережі.

Досліджено перспективи впровадження Wi-Fi 7, включаючи інновації, такі як багатоканальний доступ (MLO), модуляція 4096-QAM і розширення частотного спектра. Показано, що ці вдосконалення сприятимуть розвитку інфраструктури розумних міст, промислових мереж та IoT-рішень, забезпечуючи високу швидкість і мінімальну затримку.

У другому розділі розглянуто фізичні основи радіохвиль та їх характеристики, такі як частота, довжина хвилі та амплітуда. Визначено, що закони розповсюдження сигналу, включаючи закон оберненого квадрата, є ключовими для проектування Wi-Fi-систем. Представлено моделі розповсюдження радіохвиль, які використовуються при дослідженні Wi-Fi-систем.

Досліджено вплив середовища на розповсюдження радіохвиль різних середовищ (відкритого простору, міських і закритих приміщень) на поширення радіохвиль. Визначено, що поглинання сигналу матеріалами, кліматичні умови та архітектурні особливості суттєво впливають на якість зв'язку. Надано фактори впливу середовища на розповсюдження радіохвиль та приведено оцінку впливу на затухання сигналу. Побудовано діаграму впливу.

Досліджено основні проблеми, пов'язані із затуханням сигналу, інтерференцією та обмеженою пропускною здатністю у Wi-Fi мережах. Встановлено, що перешкоди від фізичних об'єктів і перевантаження каналів є основними викликами для стабільності з'єднання. Надано рекомендації щодо оптимального розташування точок доступу, ручного налаштування каналів та оновлення мережевого обладнання для підвищення ефективності Wi-Fi мереж. Представлено проблеми та розроблено рекомендації при поширенні сигналу у Wi-Fi мережах

У третьому розділі запропоновано методи підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль: Multi-Link Operation (MLO), розширення ширини каналів до 320 МГц, високий порядок модуляції (4096-QAM) та розширена підтримка MU-MIMO. Аналіз показав, що ці методи значно підвищують пропускну здатність, знижують затримки та підвищують ефективність використання спектру. Наприклад, MLO дозволяє розподіляти навантаження між різними діапазонами, а використання 4096-QAM забезпечує передачу даних із більшою щільністю, що є критично важливим для високошвидкісних додатків. Виконано порівняння методів покращення Wi-Fi 7 відносно Wi-Fi 6.

Моделювання, виконане з використанням симулятора NS-3, підтвердило ефективність запропонованих методів. Результати показали, що вибір частотного діапазону 6 ГГц забезпечує зменшення перешкод і покращує якість сигналу. Порівняння з реальними вимірюваннями довело достовірність отриманих результатів, незважаючи на обмеження імітаційної моделі. Отримані дані можуть слугувати основою для подальшого вдосконалення мереж Wi-Fi у різних середовищах.

# ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Qualcomm Technologies. (2024). *Wi-Fi 7: Redefining Wireless Connectivity for the Next Decade.* Retrieved from URL: https://www.qualcomm.com/media/documents/files/wi-fi-7-technology-overview.pdf

2. Broadcom Inc. (2023). *Wi-Fi 7: Enabling Ultra-Fast Wireless Connectivity.* Retrieved from URL: https://www.broadcom.com/products/wireless/wi-fi-7

3. Intel Corporation. (2023). *Advancing Wireless Technology: The Benefits of Wi-Fi 7 for High-Density Networks.* Retrieved from URL: https://www.intel.com/content/www/us/en/technology/wi-fi/wi-fi-7.html

4. Keong, J. (2022). An Introduction to Wi-Fi 7 and Its Key Features. *IEEE Wireless Communications Magazine, 29*(2), 20-28. doi: URL: https://doi.org/10.1109/WCM.2022.9743543

5. Samsung Research. (2022). *Exploring Wi-Fi 7: The Future of High-Speed Wireless Networking.* Retrieved from URL: https://research.samsung.com/publications/wi-fi-7-innovations

6. Tse D., Viswanath P. *Fundamentals of Wireless Communication.* Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 564 p.

7. Ouyang, Xing a Jian Zhao. Orthogonal Chirp Division Multiplexing. IEEE Transactions on Communications. 2024, 64(9), 3946 - 3957. ISSN 00906778. URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/7523229/

8. 3GPP, "LTE (Long Term Evolution) and LTE-Advanced," 3GPP, URL: https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte.

9. B. Farhang-Boroujeny, A. Majid and H. Moradiz, "CP-DSSS: An OFDM compatible variable rate modulation for 5G and beyond", Proc. IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF), pp. 578-583, Sep. 2020.

10. 3GPP TS 36.101 E-UTRA: User Equipment (UE) radio transmission and reception URL: http://www.3gpp.org/DynaReport/36101.htm.

11. The Evolution of Mobile Technologies: 1G 2G 3G 4G LTE URL:https://www.qualcomm.com/media/documents/files/the-evolution-of-mobile-technologies-1g-to-2g-to-3g-to-4g-lte.pdf.

12. Scott Rappaport, Theodore. Wirel les communications: principles and practice. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2015. ISBN 0-13-042232-0.

13. 5G - Fifth generation of mobile technologies URL: https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx

14. G. Proakis, John a Masoud Salehi. Communication systems engineering. 2. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. ISBN 0-13-095007-6.

15. Chiueh, Tzi-Dar a Pei-Yun TSAI. OFDM Baseband Receiver Design for Wireless Communications. Asia: John Wiley, 2007. ISBN 978-0-470-82234-0.

16. F. V. James, Daniel a Girish S. Agarwal. The generalized Fresnel transform and its application to optics. Optics Communications. 1996, 126 (4-6). URL: https://www.sciencedirect.com/ science/article/pii/0030401895007083

17. Emery, William a Adriano Camps. Introduction to Satel lite Remote Sensing: Chapter 5 - Radar (291-453). Elsevier, 2017. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ B9780128092545000051

18. T. Winthrop, John a C. R. Worthington. Theory of Fresnel Images. I. Plane Periodic Objects in Monochromatic Light. J. Opt. Soc. Am. 1965, 55 (373381). URL: https://www.osapublishing.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-55-4-373

19. Szwaykowski, Piotra Victor Arrizon. Talbot array illuminator with multilevel phase gratings. Applied Optics, Optical Society of America. 1993. URL: https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri= ao-32-7-1109

20. Ouyang, Xing, Cleitus Antony, Fatima Gunning a Hongyu ZHANG. Discrete Fresnel Transform and Its Circular Convolution. URL: https://arxiv.org/abs/1510.00574

21. Ouyang, Xing a Jian Zhao. Orthogonal Chirp Division Multiplexing for Coherent Optical Fiber Communications. Journal of Lightwave Technology. 2016, 34(18), 4376 - 4386. URL: https://ieeexplore. ieee.org/document/7536125

22. Gentile, Ken. Digital Pulse-Shaping Filter Basics. Analog Devices. One tech-

nology way, 2017, AN-922, 12. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-922.pdf

23. Arndt, Jorg. Matters Computational: Ideas, Algorithms, Source Code. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/267072412

24. Bouvet, Pierre-Jean a Yiqi Bai. Orthogonal Chirp Division Multiplexing for Underwater Acoustic Communication. Sensors. 2018, 18(11), 13. URL: https://www.researchgate.net/publication/ 328789984.

25. Lee, L.H. Charles. Convolutional Coding: Fundamentals and Applications. Boston: Artech House Publishers, 1997. ISBN 0-89006-914-X.

26. Communications Toolbox User's Guide. R2021a. Massachusetts: The MathWorks, 2021. URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/comm/comm_tbx.pdf

27. Etsi TS 101 475 v.1.2.2 (2001-02), Broadband Radio Access Networks (BRAN) Hiperlan type 2, Physical (PHY) layer - Technical specification.

28. IEEE Std 802.11a-1999(R2003), Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band

29. PEI, Soo-Chang a Jian-Jiun DING. Eigenfunctions of linear canonical transform. IEEE Transactions on Signal Processing. IEEE, 2002, 50(1), 11-26. ISSN 1941-0476. URL: https://ieeexplore. ieee.org/document/972478

30. BOMFIN, Roberto, Marwa CHAFII a Gerhard FETTWEIS. A Novel Iterative Receiver Design for CP-Free Transmission Under Frequency-Selective Channels. IEEE Communications Letters. IEEE, 2020, 24(3), 525-529. ISSN 1558-2558. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8933115

31. DIB, Leonardo de M. B. A., Guilherme R. Colen, Mateus de L. Filomeno a Moisés V. Ribeiro. Orthogonal Chirp Division Multiplexing for Baseband Data Communication Systems. IEEE Systems Journal. IEEE, 2020, 14(2), 2164 - 2174. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8779675

32. Oliveira, Lucas Giroto de, Mohamad Basim Alabd, Benjamin Nuss a Thomas

Zwick. An OCDM Radar-Communication System. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2020, 1-5. ISBN 97888-31299-00-8. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9135217

33. Oliveira, Lucas Giroto de, Mohamad Basim ALABD, Benjamin NUSS, Thomas Zwick, Yueheng LI a Liquan YU. MIMO-OCDM-based Joint Radar Sensing and Communication. 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2021, 1-5. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9411302

34. Peterle A. C. F., Costa W., Camporez H., Segatto M., Rocha H., Silva J. A. L. Comparing the Performance of OFDM and OCDM-based Visible Light Communications: Numerical and Experimental Analysis. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 196–210. DOI: 10.1590/2179-10742023v22i1270869.

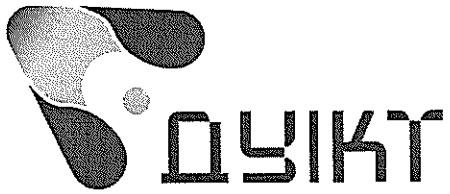
35. Ouyang X., Zhao J. Orthogonal Chirp Division Multiplexing. *IEEE Transactions on Communications*. 2016. Vol. 64, No. 9. P. 3946–3957. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2590104.

36. Bomfin R., Chafii M., Fettweis G. Low-Complexity Iterative Receiver for Orthogonal Chirp Division Multiplexing. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019. Vol. 8, No. 3. P. 885–888. DOI: 10.1109/LWC.2019.2903180.

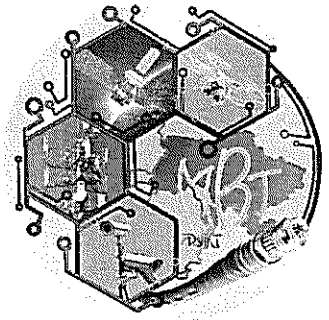
37. Sharma S., Abrol A., Jamwal S. Performance Comparison by Simulation of OFDM Model Using Different Modulation Techniques. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*. 2017. Vol. 5, No. 7. P. 904–915.

38. Sharma S., Abrol A., Jamwal S. Performance Comparison of OFDM System with Different Modulation Methods. *Communications on Applied Electronics*. 2016. Vol. 5, No. 2. P. 18–21. DOI: 10.5120/cae2016652222.

# ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



Презентація по магістерській роботі
на тему:

# Метод підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль

Виконала: Катерина ПОРХУН

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО,
д.т.н., професор

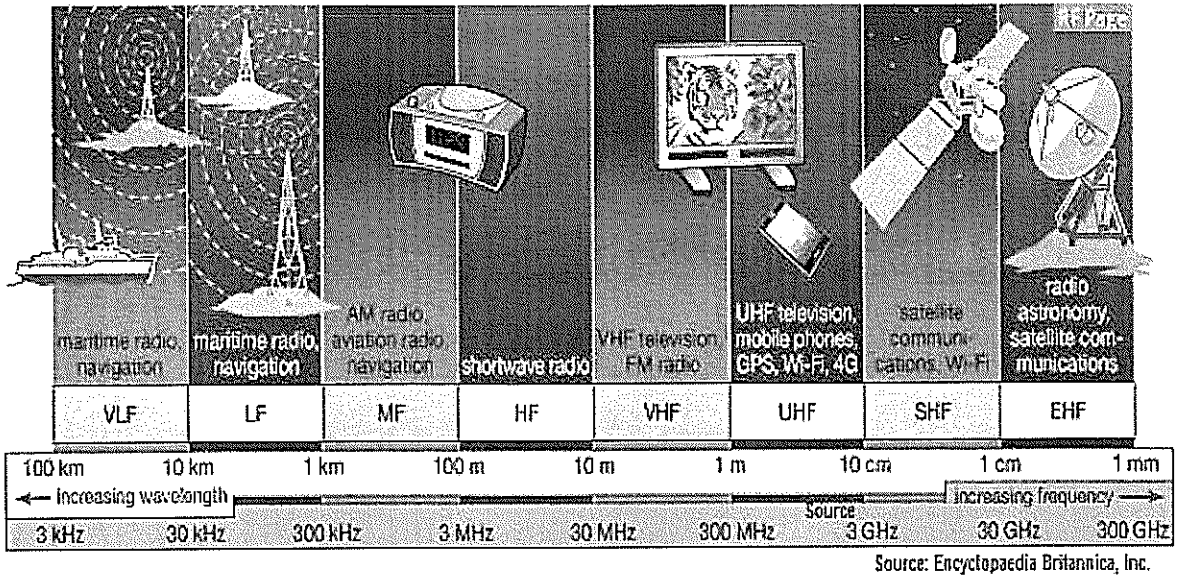
# Мета роботи

**Мета роботи** – дослідження методів підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

**Об'єкт дослідження** – процес передачі даних у безпроводових Wi-Fi мережах.

**Предмет дослідження** – методи підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль.

# Частотні діапазони радіохвиль та їх використання

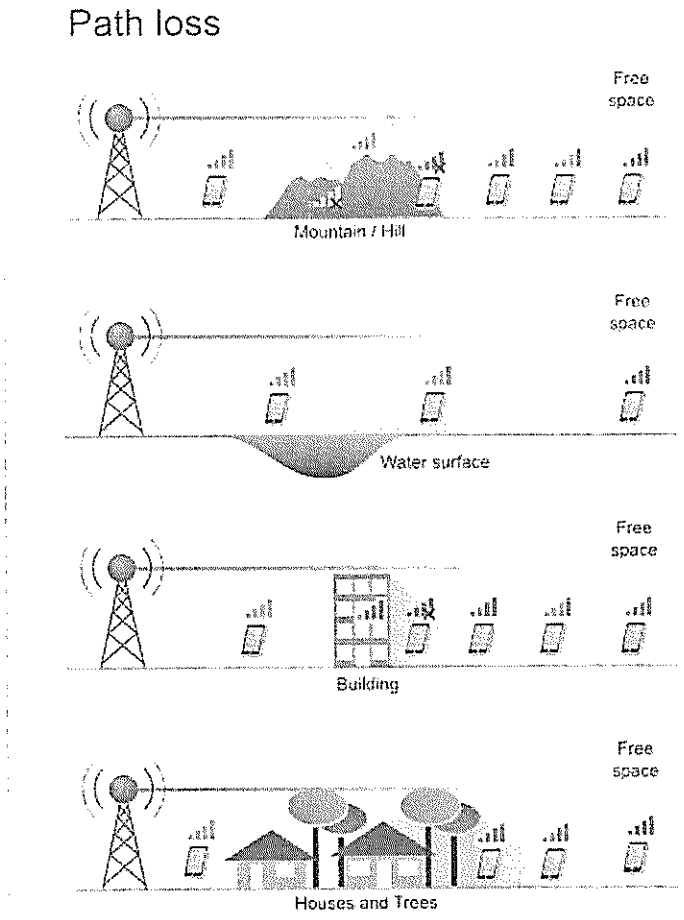


Source: Encyclopaedia Britannica, Inc.

Теорія розповсюдження радіохвиль — це розділ електродинаміки, що вивчає процеси передачі, відбиття, заломлення, дифракції та поглинання радіохвиль у різних середовищах. Вона описує фізичні закономірності взаємодії електромагнітних хвиль з природними та штучними перешкодами, а також враховує вплив географічних, атмосферних і космічних факторів на поширення сигналу. Ця теорія використовується для проєктування телекомунікаційних систем, визначення зон покриття, оптимізації антенно-фідерних систем і підвищення якості зв'язку в різних умовах.

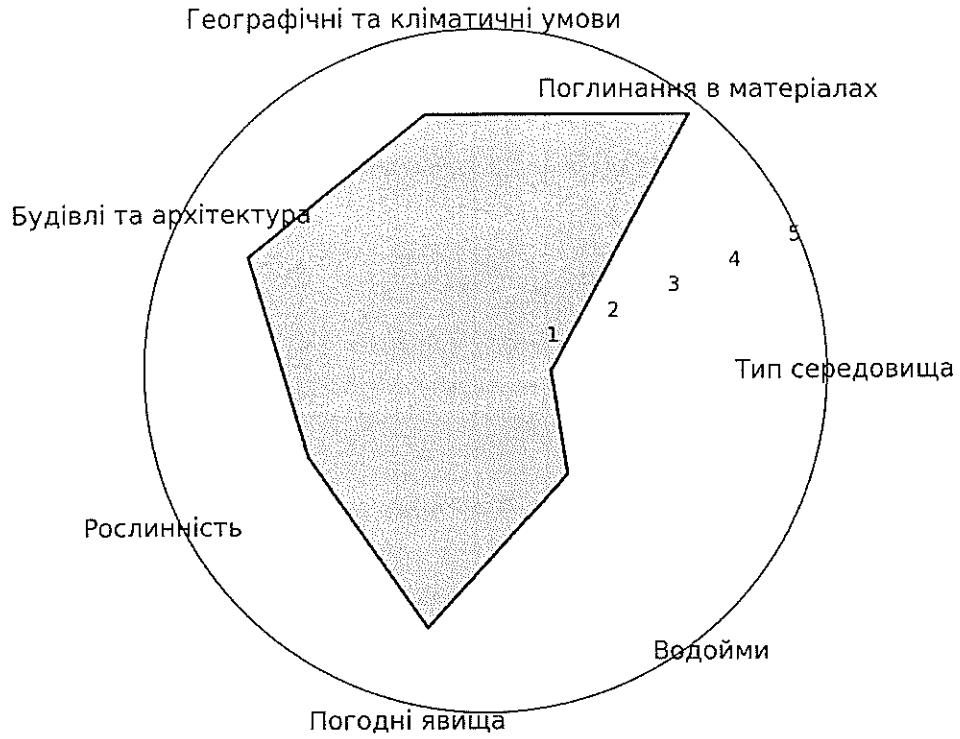
| Діапазон | Частота | Довжина хвилі | Застосування |
|---|---|---|---|
| LF | 30 - 300 кГц | 1 000 - 10 000 м | Навігація, морські комунікації |
| MF | 300 кГц - 3 МГц | 100 - 1 000 м | АМ-радіомовлення, навігація |
| HF | 3 - 30 МГц | 10 - 100 м | Короткохвильове радіо, військовий зв'язок |
| VHF | 30 - 300 МГц | 1 - 10 м | FM-радіо, телебачення, авіаційний зв'язок |
| UHF | 300 МГц - 3 ГГц | 0,1 - 1 м | Мобільний зв'язок, Wi-Fi, телебачення |
| SHF | 3 - 30 ГГц | 1 - 10 см | 5G, супутниковий зв'язок, мікрохвилі |
| EHF | 30 - 300 ГГц | 1 - 10 мм | Міліметрові хвилі для 5G, радіолокація |

# Вплив навколишніх умов на розповсюдження радіохвиль



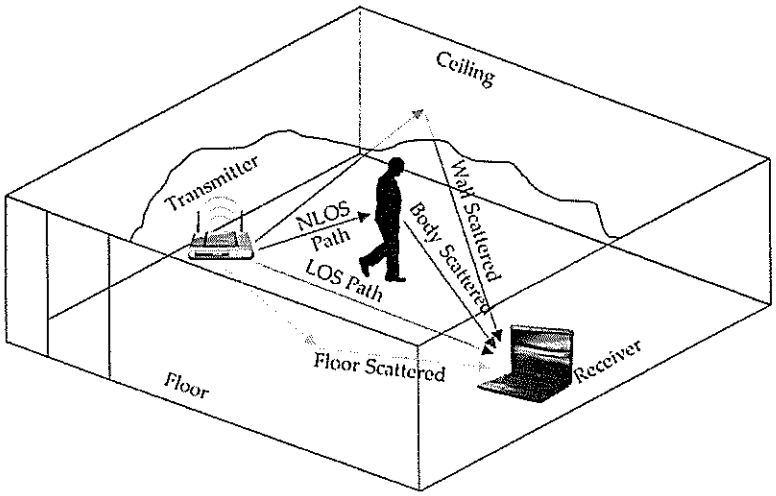

| Модель | Частотний діапазон, ГГц | Дальність, км | Похибка, дБ | Особливості |
|---|---|---|---|---|
| Модель вільного простору (Free-Space Path Loss) | 0.1 - 100 | до 20 | ±2 | Ідеалізовані умови, відсутність перешкод |
| Модель Rayleigh | 0.8 - 2.5 | до 5 | ±6 | Сильне багатопроменеве поширення |
| Модель Rician | 0.8 - 2.5 | до 10 | ±4 | Значний прямий компонент сигналу |
| Модель COST-231 | 0.8 - 2.0 | до 3 | ±8 | Для міських умов, враховує багатоповерхівки |
| Модель ITU-R | 1.0 - 3.5 | до 2 | ±5 | Емпірична модель для різних середовищ |

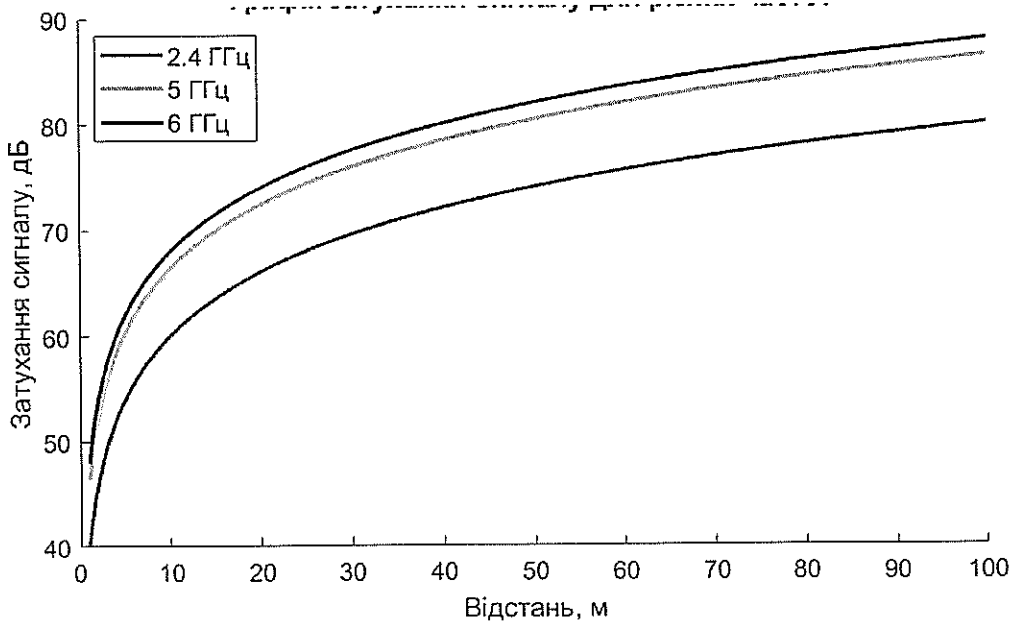
# Вплив середовища на розповсюдження радіохвиль

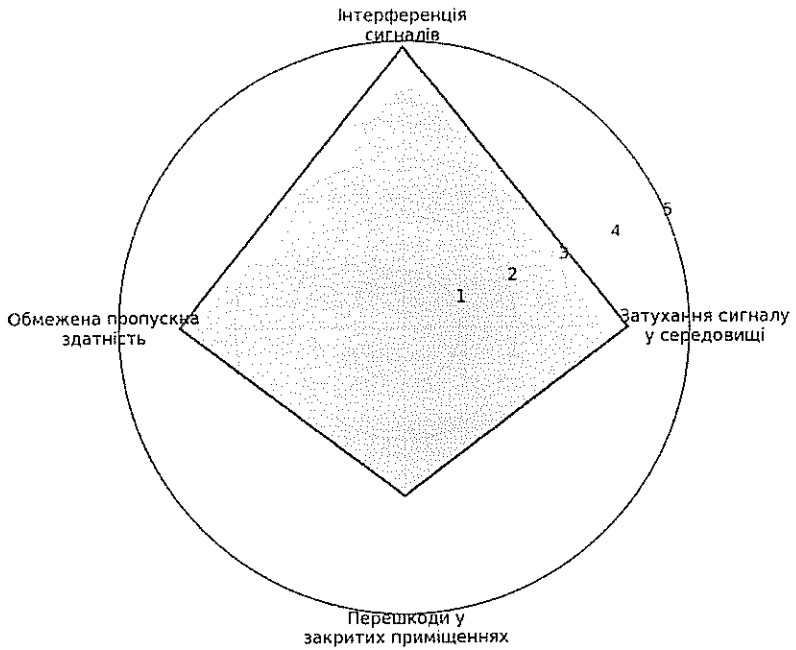



| Фактор впливу | Опис | Вплив на розповсюдження | Оцінка впливу на затухання сигналу (1–5) |
|---|---|---|---|
| **Тип середовища** | Вплив відкритого простору, міських територій і закритих приміщень на передачу сигналу. | Залежно від середовища сигнал може поширюватися з мінімальними перешкодами або втратами. | 1 - Мінімальний вплив |
| **Поглинання в матеріалах** | Різні матеріали (бетон, скло, метал) по-різному впливають на поширення радіохвиль. | Матеріали з високим рівнем поглинання, як бетон, значно знижують потужність сигналу. | 5 - Дуже високий вплив |
| **Географічні та кліматичні умови** | Температура, вологість, тиск і географічні особливості змінюють поведінку хвиль. | Зміни температури, вологості та тиску можуть викликати заломлення і розсіювання радіохвиль. | 4 - Високий вплив |
| **Будівлі та архітектура** | Відбиття та проникнення сигналів через стіни та фасади будівель. | Відбиття сигналів від будівель створює багатопроменеві ефекти, які впливають на якість передачі. | 4 - Високий вплив |
| **Рослинність** | Поглинання сигналу залежно від типу та щільності рослинності. | Щільна рослинність може поглинати або розсіювати хвилі, знижуючи силу сигналу. | 3 - Середній вплив |
| **Погодні явища** | Дощ, сніг і туман знижують якість передачі сигналу. | Дощ і сніг посилюють загасання сигналу, особливо на високих частотах. | 4 - Високий вплив |
| **Водойми** | Відбиття та дифракція хвиль від поверхні води впливають на дальність і якість сигналу. | Відбиття від води може посилювати або знижувати силу сигналу в залежності від кута падіння. | 2 - Низький вплив |

# Проблеми поширення сигналу у Wi-Fi мережах



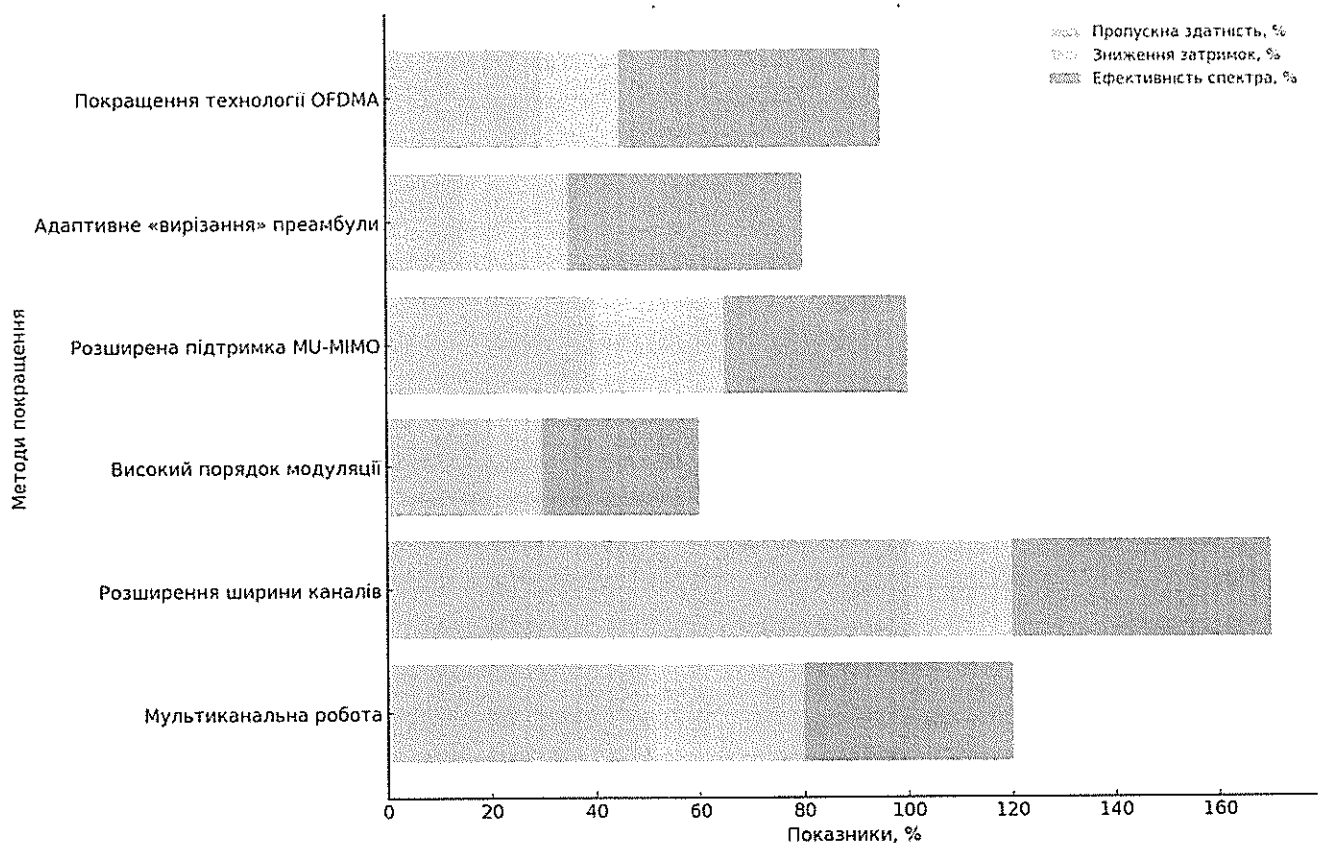





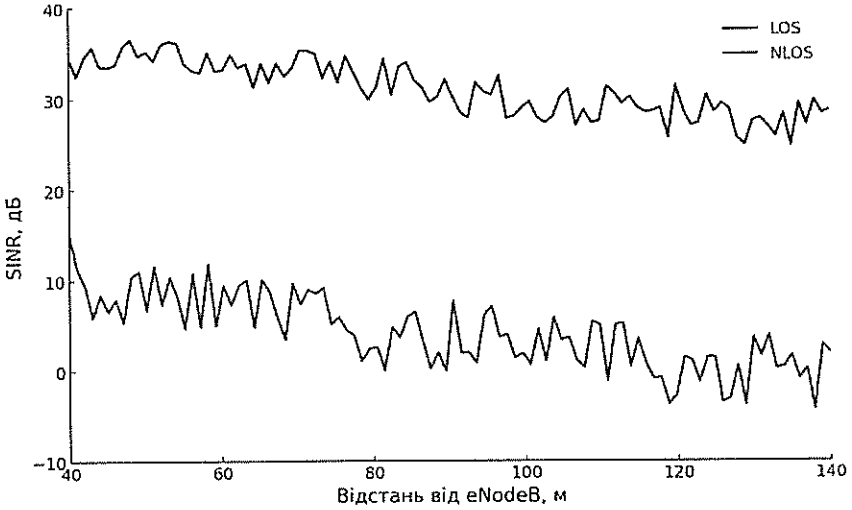

# Основні проблеми та рекомендації при поширенні сигналу у Wi-Fi мережах

| Проблема | Ключові фактори | Рекомендації для усунення | Оцінка серйозності (1–5) |
|---|---|---|---|
| **Затухання сигналу у середовищі** | Відстань, будівельні матеріали, природні перешкоди (дерева, водойми). | Оптимальне розташування точок доступу, мінімізація перешкод, підвищення висоти розміщення. | 4 - Висока |
| **Інтерференція сигналів** | Конкуренція між мережами, фізичні перешкоди (меблі, техніка), погодні умови. | Ручне налаштування каналів, уникнення фізичних бар'єрів, додаткові точки доступу. | 5 - Дуже висока |
| **Обмежена пропускна здатність** | Перевантаження точок доступу, надмірна кількість користувачів, застарілі стандарти Wi-Fi. | Розподіл навантаження між точками доступу, пріоритезація користувачів, оновлення обладнання. | 4 - Висока |
| **Перешкоди у закритих приміщеннях** | Металеві поверхні, щільність стін, взаємодія з побутовою технікою. | Стратегічне розташування маршрутизаторів, уникнення металевих бар'єрів, оптимізація розташування антен. | 3 - Середня |

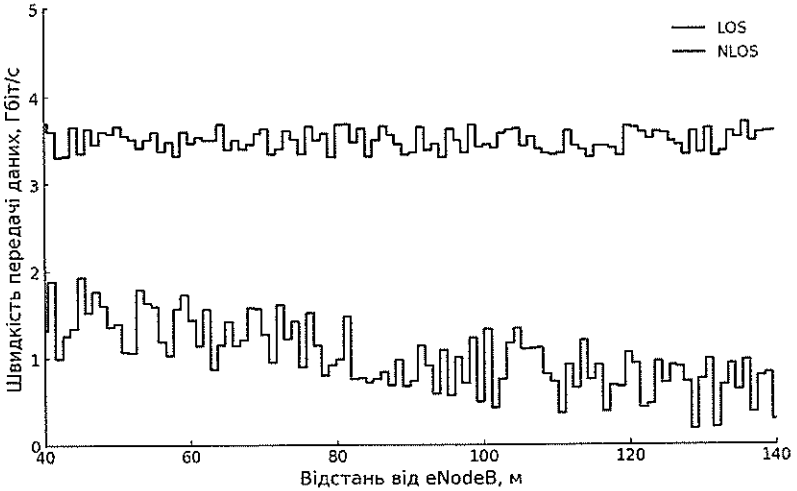
# Порівняння методів покращення Wi-Fi 7 відносно Wi-Fi 6



# Моделювання характеристик розповсюдження радіохвиль в зовнішніх умовах




Середнє значення SINR

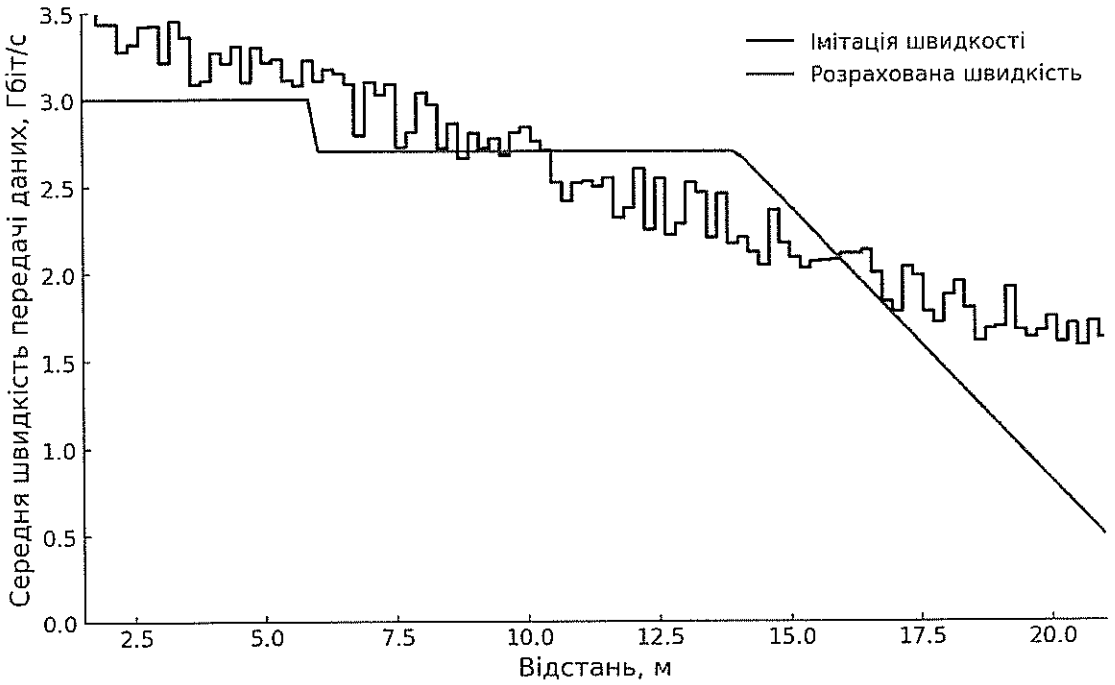



Швидкість передачі даних користувача у сценарії LOS та NLOS

# Моделювання характеристик розповсюдження радіохвиль в умовах закритої будівлі

Параметри моделювання

| Параметр | Значення |
|---|---|
| Сценарій | Закрита будівля |
| Частота | 6 ГГц |
| Передаюча потужність | 16 дБм |
| Висота антени | 1,5 м |
| Початкова відстань | 1,5 м |
| Кінцева відстань | 20 м |



# Висновки

В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

У першому розділі досліджено етапи розвитку стандартів Wi-Fi від IEEE 802.11 до сучасних Wi-Fi 6E та Wi-Fi 7, які демонструють значні вдосконалення в швидкості передачі даних, розширенні частотних діапазонів та впровадженні технологій MU-MIMO і OFDMA. Проаналізовано архітектуру Wi-Fi-мереж, включаючи точки доступу, маршрутизатори, клієнтські пристрої та системи безпеки, що впливають на стабільність і якість з'єднання. Показано перспективи впровадження Wi-Fi 7 завдяки інноваціям, як-от багатоканальний доступ (MLO) і модуляція 4096-QAM, які сприяють розвитку IoT і розумних міст.

У другому розділі розглянуто фізичні основи радіохвиль та їх вплив на Wi-Fi-мережі. Досліджено закони розповсюдження радіохвиль і вплив середовища (відкритого простору, міських і закритих приміщень) на якість зв'язку. Виявлено основні проблеми, зокрема затухання сигналу та інтерференцію, і надано рекомендації щодо оптимального розташування точок доступу й налаштування каналів для підвищення ефективності Wi-Fi-мереж.

У третьому розділі запропоновано методи покращення ефективності Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль, зокрема Multi-Link Operation (MLO), розширення каналів до 320 МГц, модуляції 4096-QAM і MU-MIMO. Проведено моделювання у NS-3, яке підтвердило ефективність цих методів, що забезпечують зменшення перешкод, покращення пропускної здатності та зниження затримок. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення Wi-Fi-мереж у різних середовищах.

**Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником**

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Катерина ПОРХУН

**Назва:** Метод підвищення ефективності роботи безпроводових технологій Wi-Fi на основі теорії розповсюдження радіохвиль

**Координатор:** Анатолій МАКАРЕНКО

**Підрозділ:** ННІТ

**Коефіцієнт подібності 1**:1.6

**Коефіцієнт подібності 2**:0.9

**Тривога:** 0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

☑ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

*Дата* *Підпис Наукового керівника*