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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації 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) Станіслав СЕРЖАНСЬКИЙ
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-62
Станіслав СЕРЖАНСЬКИЙ

Керівник: Анатолій МАКАРЕНКО

Рецензент: Вікторія Сергієнко

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сержанському Станіславу Станіславовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7»,
керівник кваліфікаційної роботи Анатолій МАКАРЕНКО, д.т.н., професор,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Безпроводова технологія Wi-Fi.
   2. Методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль.
   3. Мережевий симулятор NS-3.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Стан проблеми електромагнітної теорії.
   2. Створення 3D-моделі поширення сигналу.
   3. Результати виконаної роботи.
   4. Отримані результати практичної частини роботи.

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	19.10.23	Викон.
2.	Стан проблеми електромагнітної теорії	31.10.23	Викон.
3.	Створення 3D-моделі поширення сигналу	15.11.23	Викон.
4.	Результати виконаної роботи	29.11.23	Викон.
5.	Отримані результати практичної частини роботи	08.12.23	Викон.
6.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
7.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Станіслав СЕРЖАНСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

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

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 65 стор., 25 рис., 5 табл., 20 дж.

Мета роботи – розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi на базі програмного забезпечення NS-3 в середині будівлі офісного центру.

Об'єкт дослідження - процес побудови моделі розповсюдження радіохвиль.

Предмет дослідження – методи розробки 3D-моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi на базі програмного забезпечення NS-3.

Короткий зміст роботи: В роботі розглянуто питання моделювання розповсюдження сигналу безпроводових мереж всередині будинків.

У теоретичній частині досліджено принципи та методи поширення електромагнітних хвиль у зовнішньому середовищі та всередині будівель. Описано алгоритм та формули, що використовуються для імітації поширення сигналу WiFi 7 (6 ГГц) всередині приміщення офісного центру.

Друга половина роботи містить опис розробленої моделі, яка використовується для моделювання стандарту 802.11ad (WiGig), та результати моделювання отримані на симуляторі NS-3, їх аналіз та порівняння з результатами, отриманими в реальних вимірах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БЕЗПРОВОДОВА ТЕХНОЛОГІЯ WI-FI; 3D-МОДЕЛЬ, МЕТОДИ ТЕОРІЇ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ MATLAB, 802.11AD (WIGIG), NETWORK SIMULATOR 3

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 65 pages, 25 pictures, 5 table, 20 sources.

The purpose of the work - development of a model of propagation of radio waves of Wi-Fi wireless technology based on NS-3 software in the middle of an office center building.

Object of research – the process of building a radio wave propagation model.

Subject of research – methods of developing a 3D model of radio wave propagation of Wi-Fi wireless technology based on NS-3 software.

Summary of the work: The paper considers the issue of modeling the signal propagation of wireless networks inside buildings.

In the theoretical part, the principles and methods of propagation of electromagnetic waves in the external environment and inside buildings are investigated. The algorithm and formulas used to simulate the propagation of a WiFi 7 (6 GHz) signal inside an office center are described.

The second half of the work contains a description of the developed model, which is used to simulate the 802.11ad (WiGig) standard, and the simulation results obtained on the NS-3 simulator, their analysis and comparison with the results obtained in real measurements.

KEYWORDS: WI-FI WIRELESS TECHNOLOGY; 3D MODEL, METHODS OF THE THEORY OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION, MATLAB SOFTWARE, 802.11AD (WIGIG), NETWORK SIMULATOR 3

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

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

Направляється здобувач Сержанський С.С. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

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

на тему: Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Сержанський Станіслав Станіславович 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 Сержанського Станіслава Станіславовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

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

" " _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Сержанський С.С.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

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

" " _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Сержанського Станіслава Станіславовича

на тему: «Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7»

Актуальність:

У нинішній час потреба в безпроводових з'єднаннях стрімко росте вгору. В першу чергу це пов'язано зі зростаючими вимогами до мобільності співробітників, яка безпосередньо впливає на швидкість прийняття рішень з важливих для компанії питань. Створення функціональної 3D-моделі, що представляє простори, в яких буде виконуватися моделювання розповсюдження сигналу з акцентом на отримання високої швидкості передачі, дозволяє вирішити ці питання.

Тому, дослідження і розрахунки направлені на вирішення даних завдань є актуальними і своєчасними.

Позитивні сторони:

Робота дозволяє досить повно оцінити загальну характеристику, сутність та структуру поставленої проблеми. Дається чітке визначення мети, об'єкту та предмету дослідження. Сформульовано наукові проблеми і представлено використані методи дослідження.

Недоліки:

1. В роботі не достатньо обґрунтовані недоліки стандарту 802.11ad, що особливо актуально на частотах 60 ГГц.
2. Не достатньо описано інтеграцію програмного комплексу NS-3 з запропонованою 3D-моделю.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Сержанський Станіслав Станіславович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент: PhD _____ В.В. Сергієнко

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 9
ВСТУП 10
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ 12
1.1 Поширення загальних електромагнітних хвиль 12
1.2 Поширення мікрохвиль у частотному діапазоні від 2 до 6 ГГц 18
1.3 Технологія наступного покоління Wi-Fi 7 25
2 СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ 36
2.1 Створення моделі за допомогою інструментів управління AutoCAD 36
2.2 Принципи моделювання розповсюдження хвиль 39
2.3 Отримані результати першого тестового моделювання 43
3 РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАНОЇ РОБОТИ 45
3.1 Мережевий симулятор NS-3 45
3.2 Модель імітаційного моделювання розповсюдження радіохвиль 47
3.3 Результати моделювання розробленої моделі міліметрового діапазону (mmWave) 54
4 ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ РОБОТИ 56
4.1 Опис використаної моделі 56
4.2 Результати проведених моделювань 61
4.3 Порівняння з результатами реальних вимірювань 66
ВИСНОВКИ 70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 72
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AP	Acces Point - Точка доступу
CQI	Channel Quality Indicator - Індикатор якості каналу
IP	Internet Protokol
EHT	Extremely High Throughput
LAN	Local Area Network
LOS	пряма видимість - Line of Sight
LTE	мобільні мережі четвертого покоління - Long Term Evolution
MAC	частина лінійного шару моделі ISO / OSI - Media Access Control
MCS	модуляції і схема кодування - Modulation and Coding Scheme
MIMO	техніка комунікації з багатьма антенами - Multiple Input Multiple Output
NLOS	не пряма видимість - Non Line of Sight
OFDM	Мультиплексування з ортогональним мультиплексированием з частотним поділом - Orthogonal Frequency Division Multiplexing
SINR	Відношення сигналу до шуму і перешкод - Signal to Interference plus Noise Ratio
TCP	протокол зв'язку на транспортному рівні
TTI	інтервал слота передачі - Transmission Time Interval
UML	графічна мова - Unified Modeling Language
WiFi	безпроводова мережа - Wireles Fidelity

ВСТУП

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена перспективній технології безпроводового зв'язку Wi-Fi 7. Розвиток технологій безпроводового зв'язку невпинно продовжується, і з кожним новим поколінням мережі Wi-Fi відкриваються нові можливості та досягаються вражаючі швидкості передачі даних. Однак революційні зміни у безпроводовому зв'язку можуть настати з приходом Wi-Fi 7, очікуваної перспективної технології, яка обіцяє забезпечити ще більшу швидкість, надійність та продуктивність. Wi-Fi 7 відкриває новий рівень можливостей для підключення різноманітних пристроїв та впровадження інноваційних застосунків у всіх сферах нашого життя.

Змістом цієї роботи є теоретичний аналіз та подальша реалізація заданої теми, де у кожної з частин розглядаються можливості та методи поширення сигналу безпроводових мереж. Метою даної роботи є створення функціональної 3D-моделі, що представляє простори, в яких буде виконуватися моделювання розповсюдження сигналу, а потім реалізація згаданих моделювань у програмі Network Simulator 3 (NS-3) з акцентом на отримання високої швидкості передачі.

Перша частина магістерської роботи присвячена теоретичному аналізу принципів бездротового поширення радіосигналу та різниці між розповсюдженням у зовнішньому просторі та внутрішніх приміщеннях. Робота містить інформацію про методи розрахунку "пуску променів" та "трасування променів", що використовуються для теоретичних розрахунків шляхів поширення хвилі. Також буде проаналізовано розповсюдження сигналу в діапазоні частот 2 - 6 ГГц. Буде досліджено перспективну технологію безпроводового зв'язку Wi-Fi 7, розкрито її головні характеристики та переваги, як ця технологія може змінити наше сприйняття інтернету та спосіб взаємодії зі світом навколо нас.

Друга частина стосується опису створення 3D-моделі. Вона також містить обґрунтування вибору використовуваного програмного забезпечення та

алгоритму самої моделі.

Наступний розділ присвячений опису алгоритму, який був використаний при розрахунку розповсюдження в NS-3. Тут, серед іншого, наведені використані формули та результати першого моделювання тесту у графічній формі. Використовуваний алгоритм виконує моделювання на частоті 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц Wi-Fi.

Четверта частина роботи містить опис мережевого симулятора (NS-3) і, перш за все, розроблену модель розповсюдження радіохвиль. Потім ця модель використовувався для імітації поширення сигналу для стандарту IEEE 802.11be, тобто Wi-Fi 7. Ця частина містить детальний опис моделі, включаючи її частини та, нарешті, результати моделювання. Висновки по розділу присвячено результатам, які були отримані під час цієї роботи. Це в основному опис вихідного коду моделі та використовуваних параметрів. Крім того, ця частина містить результати, отримані в результаті моделювання. Ці результати побудовано на графіку для кращого огляду. В кінці цієї частини наводиться порівняння результатів, отриманих в результаті моделювання, з результатами вимірювань.

Мета роботи. Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7 в середині будівлі офісного центру.

Об'єктом дослідження є процес розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7.

Предметом дослідження є методи розробки 3D-моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7.

Методи досліджень. Для досягнення поставлених цілей в магістерській роботі використано: методи теорії інформації та передавання сигналів; методи теорії розповсюдження електромагнітних хвиль; методи комп'ютерного моделювання; математичної статистики.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

1.1 Поширення загальних електромагнітних хвиль

Згідно з теорією Джеймса Клерка Максвелла, який математично описав поняття електрики і магнетизму в 1864 році, можна передавати електричну енергію через вільний простір зі швидкістю, яка є кінцевою за розміром і відповідає швидкості світла, за допомогою електричних і магнітних хвиль.

Двадцять два роки потому Гендріх Рудольф Герц довів, що радіохвилі насправді є електромагнітними хвилями, і перевірив теорію Максвелла, експериментуючи, використовуючи частоти в діапазоні приблизно від 50 до 500 МГц. Завдяки цьому експерименту він зміг спостерігати два явища, що супроводжують поширення хвиль - відбиття та розсіювання.

Проведені експерименти, в тому числі і Герца, показали, що повітря як середовище дуже придатне для розповсюдження інформації за допомогою електромагнітних хвиль, особливо на великої відстані. Ця знахідка суттєво сприяла розвитку нових напрямів у галузі комунікаційних технологій на сьогоднішній день [1].

На поширення електромагнітних хвиль впливає багато факторів, але особливо ті що властиві тому середовищу, в якому хвилі поширюються. Іншим важливим фактором є довжина хвилі та відповідна їй частота випромінювання. Співвідношення між довжиною хвилі A і її частотою f, припускаючи, що хвиля рухається у вільному середовищі зі швидкістю c = 3 • 108 m / s, визначається співвідношенням

$$A = c. \tag{1.1}$$

Ця робота зосереджена в основному на частотах, що використовуються в системах стандарту IEEE 802.11 та LTE (мобільні мережі четвертого покоління -

Long Term Evolution), тобто в діапазоні приблизно від 2 до 6 ГГц.

Поширення хвилі у вільному просторі

Хвилі можна умовно розрізнити відповідно до основних механізмів їх розповсюдження до тих, які відносно близькі до земної поверхні, а також тих, що відбуваються на більших висотах відповідно. в різних шарах атмосфери і, нарешті, у космосі.

У цілях цієї роботи увага буде зосереджена на хвилях, що поширюються в безпосередній близькості від поверхні Землі.

Пряма хвиля

Пряма електромагнітна хвиля - це хвиля, яка поширюється по прямій лінії, але завдяки шаруватому профілю земної атмосфери вона ламається і, здається, згинається.

Отже, загалом, ми говоримо про пряму хвилю як про промінь, який поширюється прямолінійно по максимально короткому оптичному шляху за найкоротший час.

Відображена і розсіяна хвиля.

Якщо хвиля потрапляє на земну поверхню, залежно від нерівності поверхні та довжини хвилі, вона або розсіюється, відбивається або проходить через перешкоду. В результаті відбиття хвилі та, яка потрапила на поверхню перешкоди, відбивається назад в навколишнє середовище під тим самим кутом від цієї поверхні і продовжує рухатися в цьому напрямку. Хвильове розсіювання - це стан, при якому хвиля відскакує в декількох напрямках у точці відбиття. Розсіювання також відбувається, коли нова хвиля виникає на великій кількості випадково розташованих частинок, на які попадає вихідна хвиля.

Проходження хвилі відбувається тоді, коли хвиля може потрапити на інший бік перешкоди після удару по ній. У цій ситуації падаюча хвиля також може підстрибувати або розсіюватися (рис. 1.1).

Умови та наслідки впливу всіх факторів на конкретну хвилю загалом

непросто описати, оскільки результат завжди залежить від обставин, які суттєво відрізняються [2].

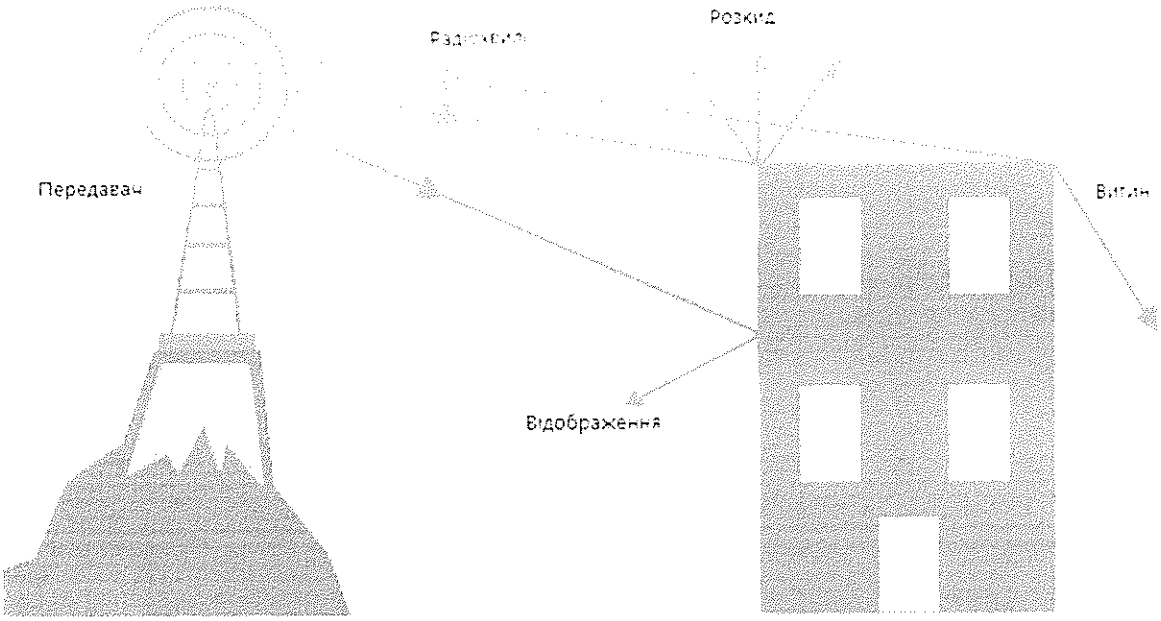


Рис. 1.1. Способи реагування хвилі на перешкоду

Поширення хвиль всередині будівель

Характер поширення електромагнітних хвиль усередині будівель працює за такими ж принципами, як у вільному просторі. Однак через менші простори та більшу кількість перешкод (меблі, стіни, вікна, двері тощо) спостерігається набагато більша кількість відблисків та розсіювання хвиль. Як наслідок дуже часто виникає явище багатократного надходження сигналу до приймача (кілька разів за різними маршрутами та з різними інтервалами часу), або в гіршому випадку він взагалі не досягає, оскільки загасання сигналу вже зросло до нестерпного значення.

Через наявність великої кількості перешкод поширення хвиль усередині будівель, порівняно з поширенням у вільному просторі, набагато складніше і його важче описати.

Відбиття хвилі. Як уже згадувалося, відбиття виникає, коли електромагнітна

хвиля досягає поверхню об’єкта, яка має великі розміри порівняно з довжиною власно хвилі, і в той же час ця поверхня досить гладка, щоб запобігти розсіянню. Насправді не тільки відбиття відбуваються на металевих поверхнях, але діелектрики та ізолятори також можуть спричиняти хвильові відбиття. Усередині будівлі можуть виникати відбиття, наприклад, від стіни кімнати, віконної панелі або дверей шафи.

Розсіювання хвиль. Розсіяння пучка хвиль викликається ударом об поверхню об'єкта, який містить велику кількість нерівностей, що мають розміри порівняні з довжиною самих хвиль. Тому це відбувається на об’єктах з шорсткою поверхнею, на дуже дрібних об’єктах або у разі інших несприятливих нерівностей на шляху поширення [3].

Хвильове згинання. Якщо між передавачем і приймачем є предмет із гострими краями, початковий напрямок поширення пучка може бути відхилений, тобто може відбутися його вигин.

Проходження хвилі. На додаток до згаданих вище ефектів взаємодії променя з об'єктом, які зазвичай стосуються лише поверхні самого об'єкта, існує ще одна можливість реагування хвилі на перешкоду. За відповідних умов промінь може пройти крізь об’єкт, що стоїть на його шляху, і продовжувати свій шлях. Яким буде вплив залежить від напрямку променя та його властивостей, тобто характеристики променя у разі перетину залежать від багатьох факторів, але особливо від потужності переданого сигналу та від матеріалу, з якого складається перешкода.

Використовуючи ці явища, можна частково визначити напрямок розповсюдження сигналу і, таким чином, наприклад, направити пучок навіть там, де немає прямого шляху від передавача до приймача (Line of Sight - LOS). З іншого боку, дуже часто з цим пов’язані небажані наслідки. Одним з таких ефектів є багатопроменеве поширення електромагнітних хвиль.

Поширення багатопроменевого шляху. Поширення багатопроменевої хвилі

відбувається, коли існує більше одного шляху, по якому хвиля може поширюватися. Така ситуація виникає після багаторазового розсіювання та відбиття хвилі. Таким чином, ці явища спричиняють більше можливих шляхів, по яких сигнал може поширюватися від передавача до приймача, крім прямого шляху (рис. 1.2).

У реальному середовищі поєднання всіх трьох випадків ефектів розповсюдження електромагнітних хвиль відбувається багатопроменево. Як результат, прийнятий сигнал - це сума всіх випадкових сигналів, які приймач приймає з усіх напрямків та кутів. Деякі з цих сигналів підтримують вихідний прямий сигнал, а деякі можуть спричинити перешкоди та втрати [3].

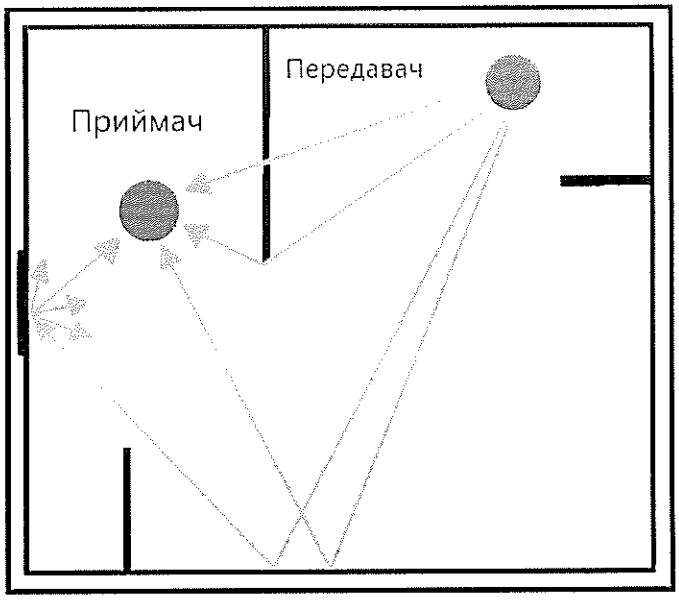


Рис. 1.2. Приклад поширення багатопроменевого пучка хвиль

Метод трасування променів

Цей метод використовується у фізиці для обчислення шляху, яким хвиля поширюється через навколишнє середовище, при цьому розрахунок маршруту йде від приймача і є більш придатним для сценаріїв "точка-точка". Отже, він враховує ефекти, пов'язані з розповсюдженням хвиль, і намагається визначити теоретичний шлях, який пройде пучок у даному середовищі. Він використовує повторення

ідеалізованих прямих хвиль, які розглядаються для спрощення розрахунків (рис. 1.4).

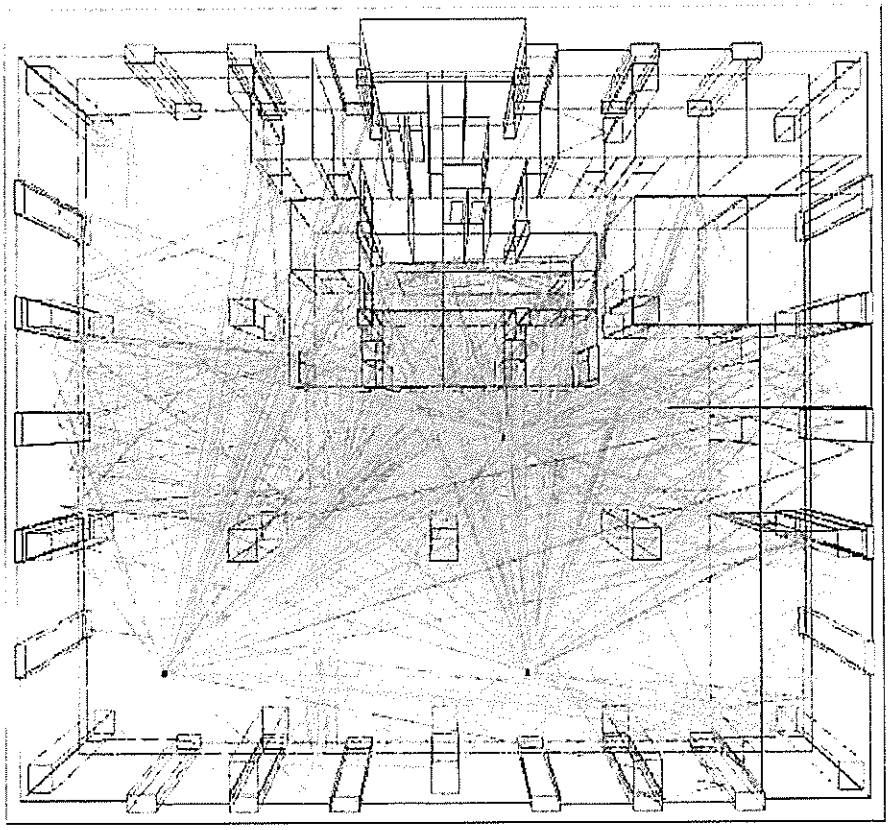


Рис. 1.3. Використання методу трасування променів у будівлі [6]

Метод розрахунку виконується таким чином, що ці дуже короткі прямі промені проходять у середовищі з іншим показником заломлення. Отже, розрахунок визначає напрямок, в якому рухатиметься цей промінь, якщо він потрапить в середовище з іншим показником заломлення. З цього виходить новий промінь з новим напрямком для центру, і процес повторюється, аж до самого кінця пульсаційного шляху. Якщо відбувається зіткнення з об'єктом, через який промінь не може пройти, напрямок поширення перераховується і процес повторюється.

Такі властивості, як інтенсивність, довжина хвилі та полярність, сильно впливають на результати розрахунку і їх слід враховувати.

Також для розрахунку необхідно, щоб передавач був встановлений у фіксованому положенні і жодним чином не переміщувався. Навпаки, приймач повинен рухатися по досліджуваній поверхні. З цього випливає, що інтенсивність часу цього методу пов'язана з кількістю обчислювальних точок [4, 5].

Метод запуску променя

На відміну від методу "трасування променів", метод "пуску променя" обчислює шлях поширення променя від передавача. Цей метод більше підходить для сценаріїв "точка-багатоточка", а тому є більш придатним, наприклад, для планування безпроводових мереж та оптимізації внутрішньої реалізації безпроводових мереж. Також при цьому легше передбачити охоплення простору. Як правило, це чисельніше ефективніше, ніж трасування променів, і забезпечує відносно більш прийнятний рівень точності.

Для розрахунків використовується вибірка зображень, яка враховує дискретні промені з заданими кутами. Це неминуче створює прогалини в просторі променів або розсіювання променів. Цю проблему можна вирішити, використовуючи так звану сферу прийому. Для кращих результатів можна надіслати більше пучків, однак ця дія неминуче призведе до повільніших розрахунків.

Взагалі, метод запуску променя враховує окремі промені і ітеративно обчислює їх відбиття, розсіювання та проходження. Таким чином, піксель зображення отримує інформацію з інших пікселів на тому ж шляху [5].

1.2 Поширення мікрохвиль у частотному діапазоні від 2 до 6 ГГц

Електромагнітні хвилі з частотою 2 ГГц, називається НВЧ випромінювання, (надвисокі частоти). Ця смуга частот також відома як сантиметр або діапазон міліметрів, залежно від довжин хвиль, які приймають значення від одиниць міліметрів до 10 см і, таким чином, використовують прямі промені мікрохвиль

для зв'язку точка-точка. Частоти в цьому діапазоні найчастіше використовуються для супутникового зв'язку, радіолокаційного зв'язку, у мережах бездротової локальної мережі (Local Area Network), а також у мікрохвильових печах [7].

Властивості поширення міліметрових і сантиметрових хвиль близькі до властивостей поширення світла. За перешкодами, що стоять на шляху хвиль, створюються тіні, схожі на світлові. Зі збільшенням частот зростає і діапазон випромінювання, і здатність проходити через перешкоди. Плануючи будівництво будівлі, слід заздалегідь врахувати вплив її конструкції на поширення хвиль всередині та зовні [8].

Моделі прогнозування поширення сигналу

Незважаючи на те, що вже проведено велику кількість експериментів, що вивчають вплив середовища на поширення хвиль, більшість із них використовували одну з моделей прогнозування. Хоча таких моделей декілька, все одно неможливо передбачити, як саме будуть поводитися хвилі в даному середовищі. Саме з цієї причини кілька найчастіше реалізуємих моделі прогнозування поширення сигналу будуть описані в наступному розділі.

Модель Окумура-Хата

Ця модель в основному використовується для прогнозування розповсюдження сигналу в забудованих районах з прямими та непрямими шляхами між передавачем та приймачем. У розрахунку використовується відстань між антенами, частота хвиль та інші параметри, такі як потужність передавальної антени, її висота, висота навколишніх будівель та місцевості.

Рівняння для розрахунку ослаблення сигналу LH для цієї моделі має такий вигляд:

$$\begin{aligned} L_H\,(dB) = 69.55 + 26.16\log(f) - 16.82\log(h_t) \\ -a\,(h_r) + (44.9 - 6.55\log(h_t))\log(d). \end{aligned} \tag{1.2}$$

де f - частота хвилі в ГГц, d - відстань між передавачем і приймачем в км, ht

і hr - висота передавача і приймача [8].

Модель COST-231

COST-231 є продовженням моделі Окумура-Хата і використовується, як правило, для частот близько 2 ГГц. Подібно до попередньої моделі, вона знаходить своє застосування для прогнозування поширення сигналу в забудованих районах.

Тоді рівняння для розрахунку ослаблення сигналу L231 для цієї моделі має такий вигляд:

$$L_{231}(dB) = 46,3 + 33,9\log(f) - 13,82\log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55\log(h_t))\log(d) + C. \quad (1.3)$$

де C - константа, яка приймає значення, для густо забудованих ділянок 3 дБ, для малозаселених ділянок 0 дБ [8, 9].

Модель відстані

На відміну від попередніх двох, ця модель займається передбаченням поширення сигналу безпосередньо всередині будівлі. При цьому передбачається, що зі збільшенням відстані між передавачем і приймачем загасання сигналу буде зростати в геометричній прогресії. Як правило, рівняння для загасання виражається:

$$L_L(dB) = L_0 + 10\gamma\log(\frac{d}{d_0}) + X_g. \quad (1.4)$$

де L0 - ослаблення на опорній відстані d0, d - відстань приймача від передавача, Y - показник ослаблення, а Xg - випадкова величина Гауса з нульовим середнім значенням [9].

Порівняння діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц

Зі збільшенням частоти відстань, на яку здатна поширюватися хвиля, зменшується. Звідси випливає, що якщо необхідно охопити велику територію, то з

фінансової точки зору краще використовувати системи, що працюють на більш низьких частотах, для чого буде достатньо. лише невелика кількість передавачів. Однак, використовуючи нижчі частоти передавальних сигналів, передана потужність зменшується. З іншого боку, більш високі частоти дозволяють збільшити швидкість передачі даних як у висхідній, так і в низхідній лініях [10].

Діапазон частот 2,4 ГГц, широко використовуваний у бездротовому зв'язку, має ширину лише 80 МГц і пропонує максимум лише три канали, що не перекриваються. На відміну від цього, смуга частот 5 ГГц забезпечує набагато більшу кількість каналів, що не перекриваються (загалом 23 при смузі пропускання 20 МГц), що дозволяє збільшити пропускну здатність (рис. 1.4, 1.5, табл.. 1.1).

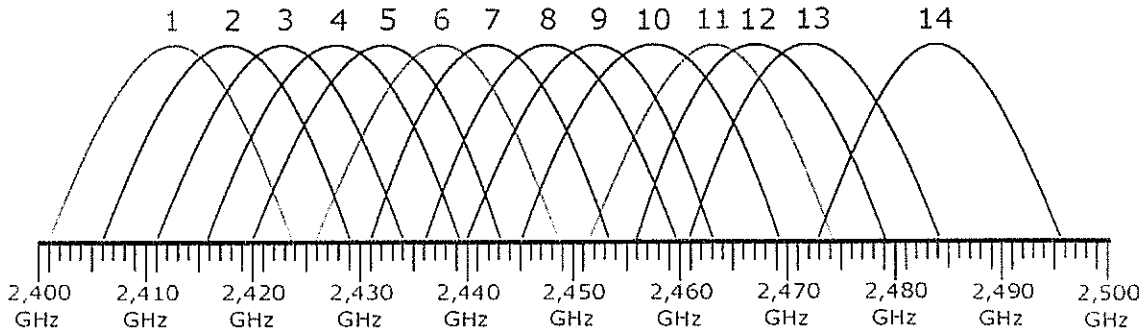


Рис. 1.4. Розташування каналів передачі WiFi у діапазоні 2,4 ГГц із позначеним та канали, що не перекриваються

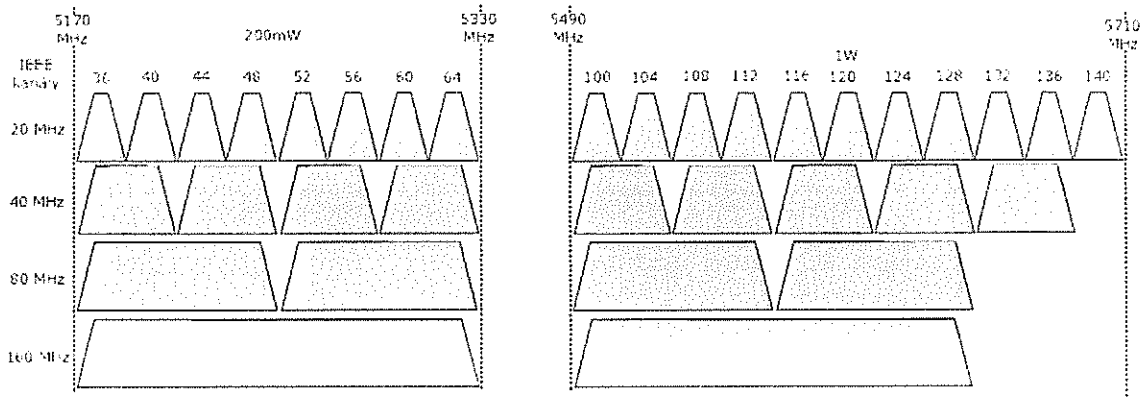


Рис. 1.5. Розташування каналів передачі WiFi у діапазоні 5 ГГц

Таблиця 1.1

Розташування каналів Wi-Fi 5 ГГц відповідно до EN 301893 v1.8.1

Зона	Канал	Частота, МГц
Діапазон A UNII-1 Нижній	36	5170-5190
	40	5190-5210
	44	5210-5230
	48	5230-5250
Діапазон A UNII-2 Середній	52	5250-5270
	56	5270-5290
	60	5290-5310
	64	5310-5330
Діапазон B UNII-1 Розгорнуто	100	5490-5510
	104	5510-5530
	108	5530-5550
	112	5550-5570
	116	5570-5590
	120	5590-5610
	124	5610-5630
	128	5630-5650
	132	5650-5670
	136	5670-5690
	140	5690-5710
Зона C UNII-3 Верхня	149	5735-5755
	153	5755-5775
	157	5775-5795
	161	5795-5815

Основні відмінності - це ширина каналу, діапазон, бітрейт і, звичайно, частота. Загалом, якщо вам потрібно застосувати більш високу швидкість передачі даних, рекомендується використовувати Wi-Fi 5 ГГц. Те саме стосується навіть тих випадків, коли необхідно усунути взаємні перешкоди більшої кількості пристроїв на частоті 2,4 ГГц. І навпаки, якщо головним пріоритетом є охоплення якомога більшої території, технологія 2,4 ГГц знайде своє застосування (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Розташування каналів Wi-Fi 2,4 ГГц відповідно до EN 300328 v1.9.1

Канал	Частота, МГц
1	2401-2423
2	2406-2428
3	2411-2433
4	2416-2438
5	2421-2443
6	2426-2448
7	2431-2453
8	2436-2453
9	2441-2463
10	2446-2468
11	2451-2473
12	2456-2478
13	2461-2483
14	2473-2495

Плануючи бездротову мережу, також необхідно враховувати, що діапазон 2,4 ГГц зараз майже переповнений і може бути порушений оточуючими джерелами, що передають сигнали тієї ж частоти [10].

Стандарт IEEE 802.11ad (WiGig)

Зростаючі вимоги до обсягу даних, що передаються через бездротові мережі, постійно зростають, і існуючі мережі часто вже не в змозі задовольнити ці вимоги. З цієї причини, серед іншого, був створений стандарт IEEE 802.11ad, який завдяки скороченню часу на синхронізацію даних між двома пристроями здатний забезпечити до десяти разів більшу швидкість передачі порівняно із загальновживаними стандартами [11]. Це також може забезпечити швидший зв'язок між пристроями на фізичному рівні.

Стандарт IEEE 802.11ad є доповненням до стандарту IEEE 802.11 для розширення до мультигігабітної пропускної здатності в діапазоні 6 ГГц. На рис. 1.6 показано спектр з неліцензійною смугою для даного континенту. У цій смузі спектр 7 ГГц, як правило, призначений для неліцензійного використання. Для порівняння, для діапазону 2,4 ГГц це всього 83,5 МГц. Цей стандарт визначає 4 канали, кожен з шириною 2,16 ГГц, які в 54 рази ширші, ніж канали стандарту IEEE 802.11n [11].

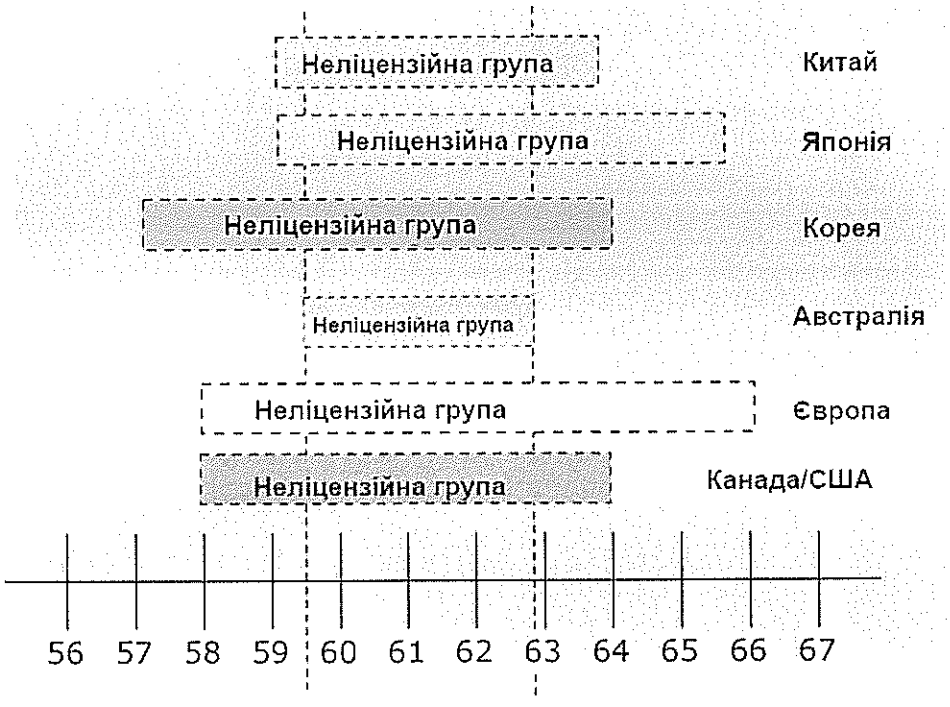


Рис. 1.6. Розгортання неліцензійних смуг IEEE 802.11ad

Цей стандарт використовує модуляцію з однією несучою (SC), а також мультиплексування з ортогональним розподілом частоти (OFDM). OFDM забезпечує більшу відстань зв'язку та кращий розподіл затримки. Таким чином забезпечується гнучкість в роботі з перешкодами і відбиттям сигналів. OFDM підтримував еструс SQPSK, QPSK, 16 QAM і 64 QAM модуляцію, максимальна теоретична портативна швидкість руху сови на фізичному рівні до 6,756 Гбіт / с. На відміну від цього, модуляція SC менша.

Вимоги до споживання енергії спрямовані насамперед на невеликі пристрої, такі як бездротові телефони. При цьому використовується модуляція n / 2-B / SK, n / 2-QPSK та / 2-16-QAM з максимальною теоретичною швидкістю передачі 4,620 Гбіт / с [11].

1.3 Технологія наступного покоління Wi-Fi 7

WiFi 7 — це майбутній стандарт Wi-Fi, також відомий як IEEE 802.11be Extremely High Throughput (EHT). Він працює в усіх трьох діапазонах (2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц), щоб повністю використовувати ресурси спектру. У той час як WiFi 6 було створено у відповідь на зростання кількості пристроїв у світі, мета WiFi 7 полягає в тому, щоб забезпечити вражаючу швидкість для кожного пристрою з більшою ефективністю. Якщо постійно виникає проблема буферизацією, затримками або перевантаженням, маршрутизатор WiFi 7 може стати найкращим рішенням [1, 5, 12].

WiFi 7 (з технічною назвою IEEE 802.11be) планувалося як наступне покоління стандартів бездротового зв'язку, що мало на меті значно підвищити швидкість, надійність та ефективність Wi-Fi мереж.

Основні передбачувані характеристики WiFi 7 включали:

Вища пропускна здатність: Очікувалося, що WiFi 7 забезпечує значно вищі швидкості передачі даних порівняно з попередниками, такими як WiFi 6 і WiFi 6E.

Покращена ефективність: Завдяки використанню більш сучасних технологій модуляції та передачі даних, WiFi 7 планувалося оптимізувати використання радіочастотного спектру.

Краща підтримка високої щільності пристроїв: WiFi 7 мало бути адаптовано до обслуговування великої кількості пристроїв одночасно, що є важливим для сучасних сценаріїв використання, таких як інтелектуальні будинки, офісні мережі та громадські Wi-Fi точки доступу.

Поліпшена надійність: Планувалося, що WiFi 7 забезпечить стабільніші та надійніші з'єднання, що є критично важливим для додатків, які вимагають високої якості зв'язку, наприклад, для відеоконференцій чи онлайн-ігор.

Зменшення затримок: Однією з цілей WiFi 7 було зменшення затримок у передачі даних, що сприяло б покращенню використання мережі для реального часу додатків, таких як віртуальна реальність (VR) та додатки з доповненою реальністю (AR).

Сумісність із попередніми стандартами: Як зазвичай з новими поколіннями Wi-Fi, очікувалося, що WiFi 7 буде сумісним із попередніми стандартами.

WiFi 7 пропонує надшироку смугу пропускання 320 МГц, 4096-QAM, Multi-RU та Multi-Link, щоб забезпечити швидкість у 4,8 рази вищу, ніж у WiFi 6, і в 13 разів швидше, ніж у WiFi 5. На рис. 1.7 наведено порівняння пропускної здатності стандартів IEEE 802.11be/ 802.11ax/ 802.11ac.

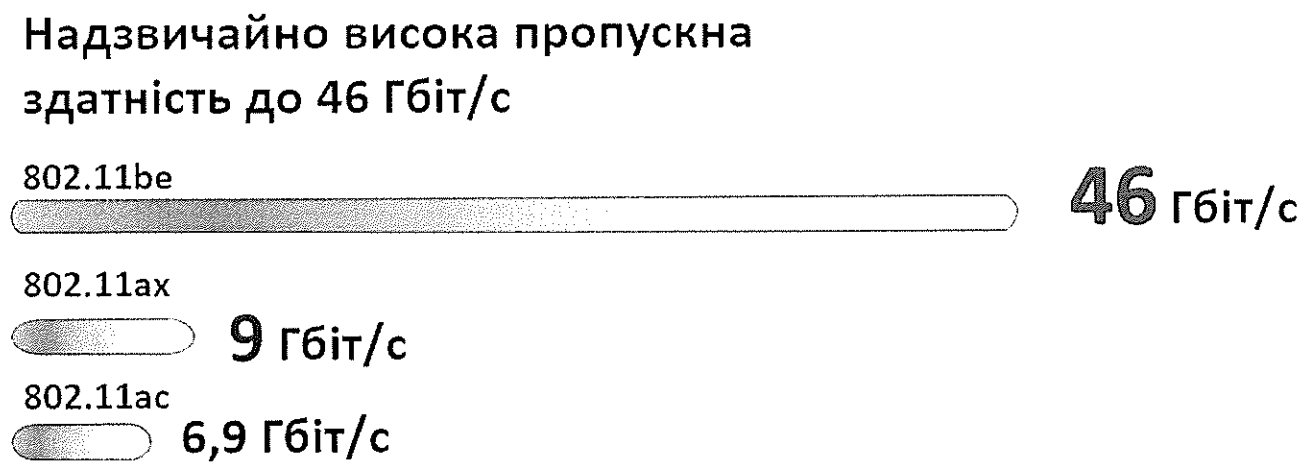


Рис. 1.7. Порівняння пропускної здатності IEEE 802.11be/ 802.11ax/ 802.11ac

У поєднанні з багатопоточним режимом нового покоління і при врахуванні втрат бездротового з'єднання така мережа буде застосована в комерційних закладах, громадських місцях з великою прохідністю, офісами. Також відмінно підійде для створення локальних мереж, де потрібна швидка передача в єдиному просторі без зайвих проводів та обладнання. Ще роутери з підтримкою Wi-Fi 7 нагоді для використання AR і VR гарнітур, які мають проблему зі стисненням дозволу через недостатню швидкість обміну [12, 13].

Пропозиції WiFi 7 від розробника:

WiFi 7 прискорює пропускну здатність до 46 Гбіт/с, що в 5 разів швидше попереднього стандарту;

Затримка в 100 разів менша порівняно з WiFi 6 і в 15 разів краща продуктивність порівняно з AR/VR;

забезпечує до 5 разів більшу пропускну здатність, ніж WiFi 6, завдяки 320 МГц і багатоканальності MLO (Multi-Link Operation).

Незважаючи на те, що WiFi 6 забезпечував на 37% більшу швидкість, це не було таким впливовим, як 10-кратне збільшення швидкості, яке принесло WiFi 5. Різниця випливає з початкового наміру проекту WiFi 6, метою якого було підвищення ефективності, а не швидкості передачі даних. WiFi 7, з іншого боку, розроблено для покоління з вищою пропускною здатністю.

WiFi 7 досягає гігантських успіхів у пропускній здатності — на 480% більше, ніж у попередніх поколінь. Завдяки зворотній сумісності маршрутизатор WiFi 7 відкриває максимальні нові можливості онлайн (табл. 1.3).

Функціонування WiFi 7:

«Подвоєння ширини, подвоєння швидкості» який розширює ширину каналу до 320 МГц (тобто маршрутизатор займатиме одночасно від 1 до 32 каналів), забезпечує швидку і одночасну передачу даних на 6 ГГц: WiFi 7 повністю розкриває потенціал діапазону 6 ГГц (рис. 1.8), щоб подвоїти пропускну здатність останнього покоління. Розширення ширини каналу до 320 МГц також забезпечує багато одночасних передач на максимально швидких швидкостях. При цьому серйозних перешкод навіть при великій щільності таких пристроїв у

багатоквартирному будинку не буде, оскільки такі короткі хвилі просто не добиватимуть до іншої квартири.

Таблиця 1.3

Порівняння показників поколінь Wi-Fi

	WiFi 5	**WiFi 6**	**WiFi 6E**	**WiFi 7**
Дата запуску	2013	2019	2021	**2024 (попередньо)**
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**
MAC	/	/	/	**MLO**

«Подвоєння потоків, подвоєння місткості» 16 × 16 MU-MIMO (рис. 1.9), тобто 16 просторових потоків, збільшується кількість антен і подвоюється швидкість передачі даних. Це гарантує, що кожен пристрій має достатню пропускну здатність для швидкої роботи. Щоб задовольнити зростаючі потреби в трафіку, викликані збільшенням кількості пристроїв WiFi, точки доступу продовжують збільшувати кількість антен і вдосконалювати можливості просторового мультиплексування. WiFi 7 збільшує кількість просторових потоків

з 8 до 16. Таким чином, теоретична фізична швидкість передачі даних подвоюється порівняно з WiFi 6. Завдяки 16 потокам WiFi 7 кожен пристрій має достатню пропускну здатність для безперебійної роботи. Цей параметр буде корисним, в першу чергу, для комерційного чи корпоративного користування.

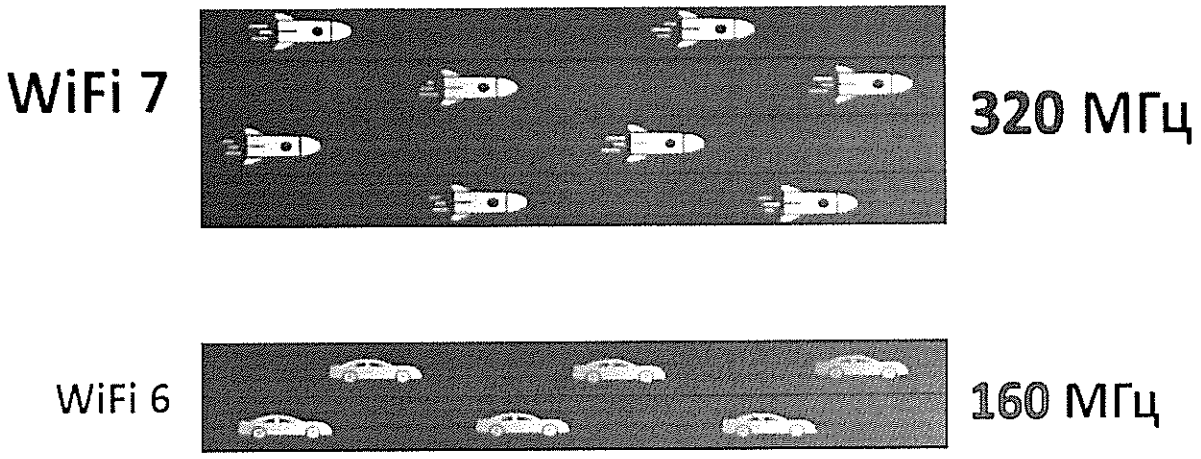


Рис. 1.8. Ширина каналу до 320 МГц, передача даних на 6 ГГц

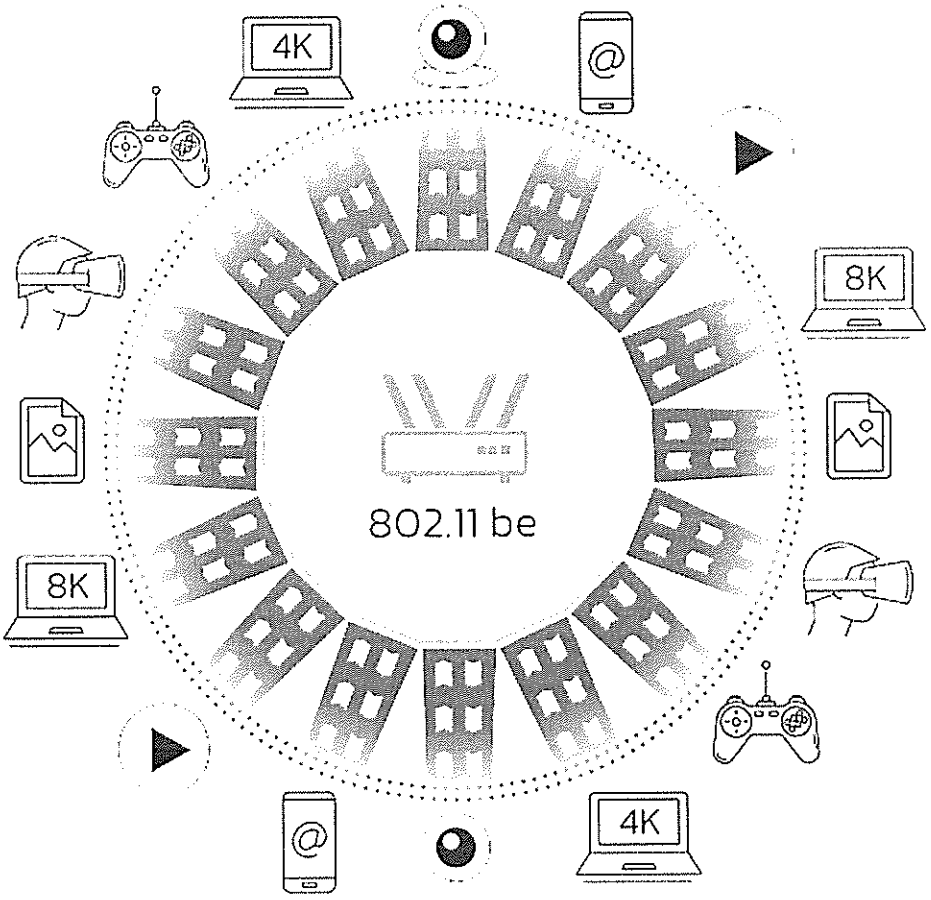


Рис. 1.9. MU-MIMO - одночасне транслювання сигналів із кількох джерел в декілька систем

«Вища швидкість, менша затримка, більша надійність» - до WiFi 7 передача була обмежена одним діапазоном, наприклад 2,4 ГГц або 5 ГГц. Функція Multi-Link Operation (MLO) дозволяє пристрою одночасно підключатися до кількох діапазонів (рис. 1.10), забезпечуючи більш високі швидкості за рахунок агрегування пропускної здатності, з більш надійними з'єднаннями WiFi на кількох одночасно використовуваних діапазонах.

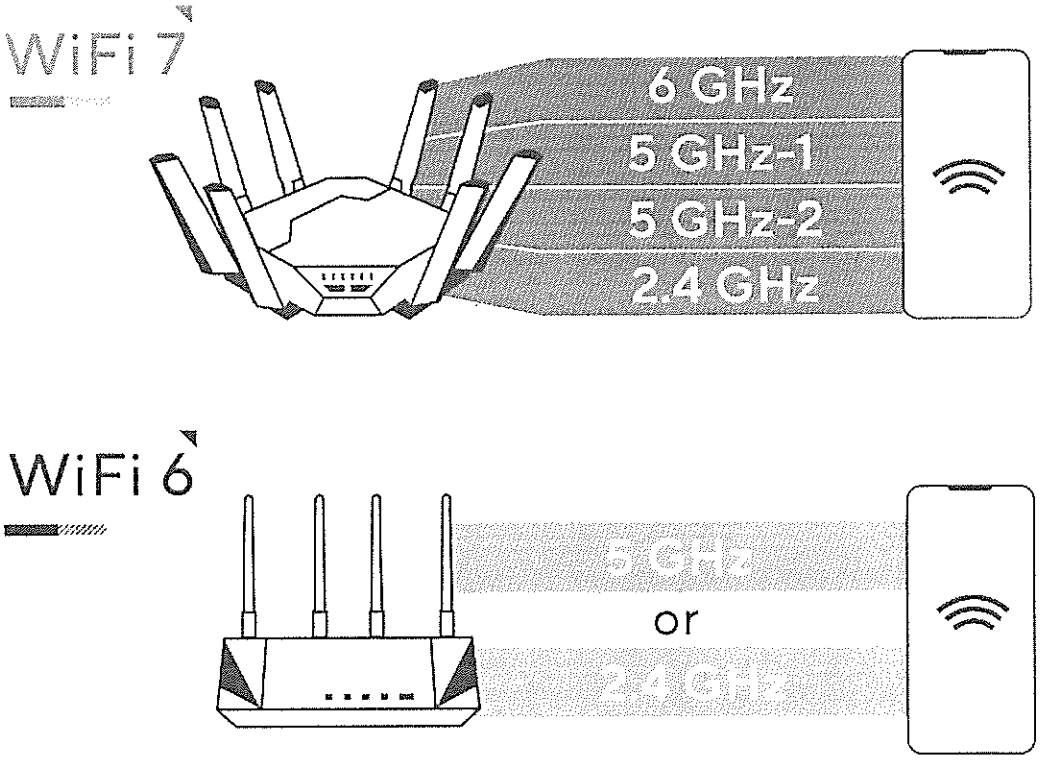


Рис. 1.10. Одночасне підключення до кількох діапазонів

«Упаковування 120% даних» для більшої швидкості 4K-QAM. Для подальшого підвищення пікових частот WiFi 7 використовує схему модуляції вищого порядку: 4096-QAM. Це дозволяє кожному символу передавати 12 біт, а не 10 біт, що означає на 20% вищу теоретичну швидкість передачі, ніж 1024-QAM WiFi 6. Вища швидкість передачі дозволяє користувачам отримати вищу ефективність передачі. Тепер ви можете дивитися бездоганні відео 4K/8K, грати в масштабні онлайн-ігри без затримок або проводити прямі трансляції зі свого домашнього комп'ютера. З 4096-QAM потокове передавання стало набагато кращим (рис. 1.11).

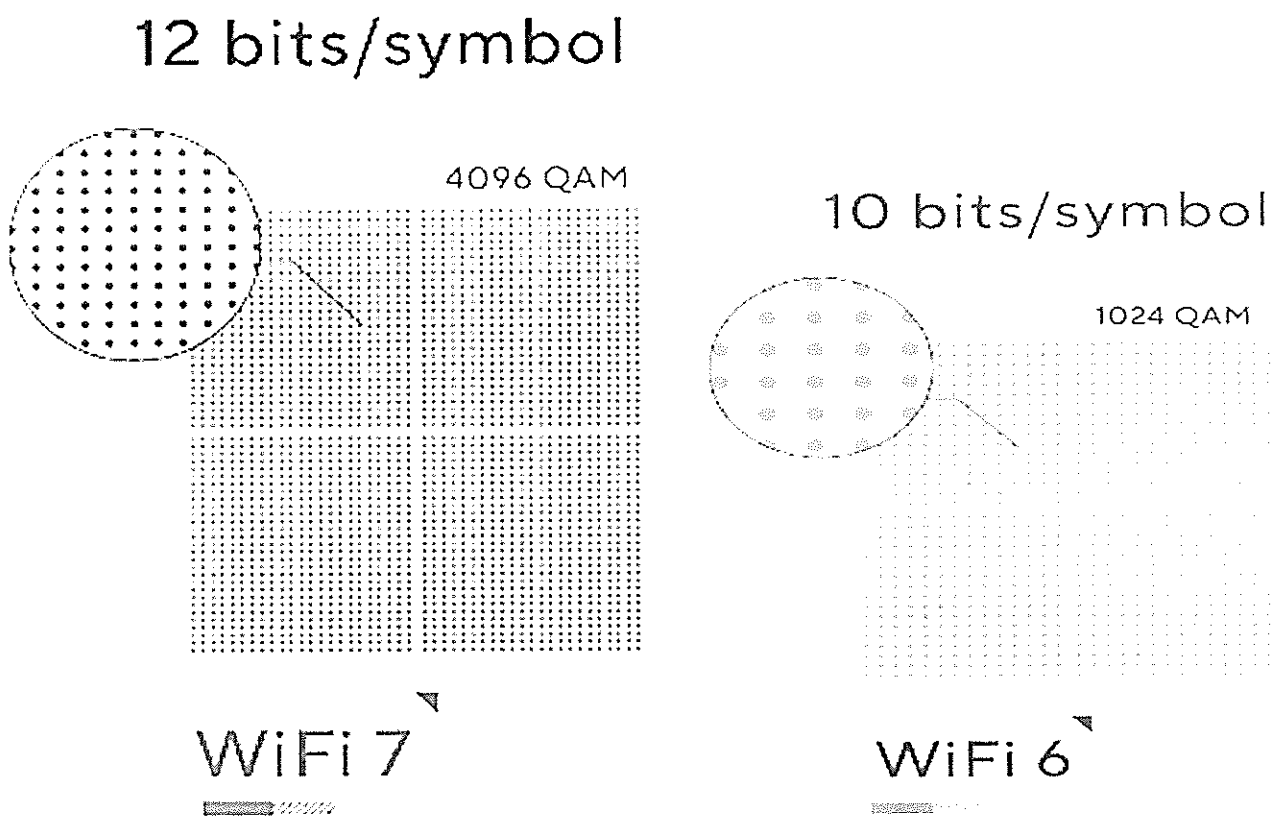


Рис. 1.11. швидкість передачі WiFi 7 вища на 20%

«Ні відходів, ні заторів» - пунктування преамбули. У WiFi 6 ресурс спектру може бути витрачений даремно, якщо канал стикається з перешкодами сигналу, зайняті канали означали, що діапазони не можуть використовуватися повністю. Тепер, за допомогою Preamble Puncturing (рис. 1.12), перешкоди можна блокувати, відкриваючи більше каналів для використання, пристрої WiFi 7 зможуть повною мірою використовувати решту каналів, які не використовуються або перериваються. Таким чином, пропускна здатність Wi-Fi може використовуватися ефективно, щоб зробити передачу даних швидшою та надійнішою.

Програми WiFi 7:

Бізнес: Довге очікування входу, несинхронізовані віртуальні зустрічі та перевантажене Інтернет-середовище – усе це ускладнює виконання роботи. Для більш плавної та надійної роботи Wi-Fi 7 надає можливість проводити зустрічі без затримок у різних часових поясах із глобальними партнерами. Також є можливість працювати з дому за допомогою Wi-Fi 7, щоб не витрачати час на завантаження даних із хмари. Вища ефективність наступного покоління WiFi

принесе величезну цінність бізнесу.

Розваги: Надання можливості насолоджуватися масовими онлайн-іграми, захоплюючим AR/VR і відео 4K/8K у будь-який час та в будь-якому місці. Насолоджуйтеся жвавим цифровим світом без буферизації, затримок і перевантажень – і все завдяки WiFi 7. Коли всі почнуть досліджувати Метавсесвіт, користувачі WiFi 7 будуть готові.

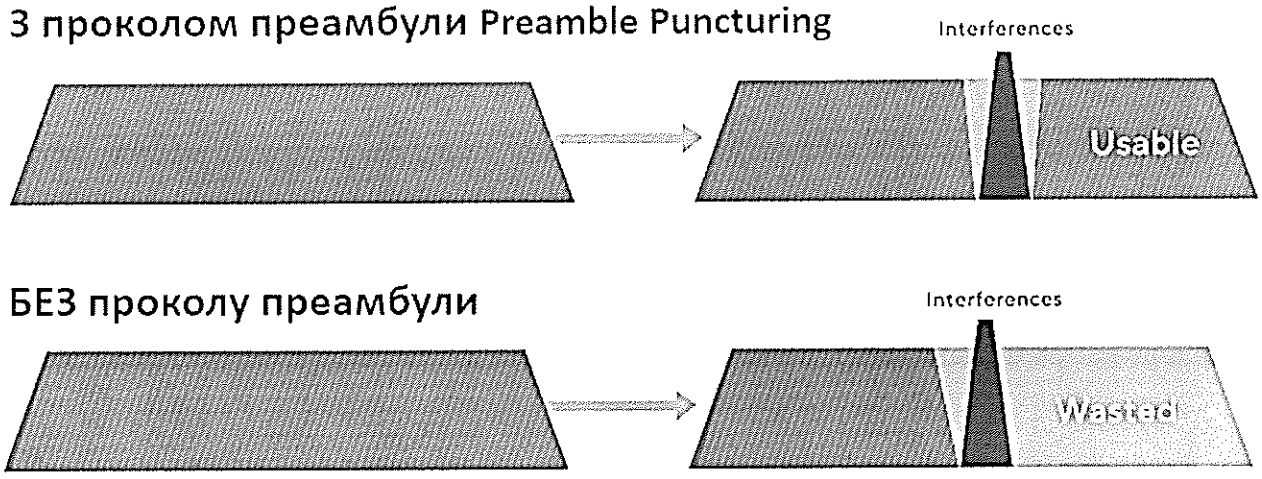


Рис. 1.12. Блокування перешкод за допомогою Preamble Puncturing

Інтелектуальний способі життя: WiFi 7 веде до справжнього розумного життя. Якщо у вас є кілька пристроїв для розумного дому або просто є велика кількість інтернет-пристроїв у родині, WiFi 7 забезпечить їх підключення до мережі з надшвидким часом відгуку. Більше ніяких пауз, перш ніж розумний динамік дасть відповідь. Все відбувається відразу, саме тоді, коли це необхідно.

Кому потрібен WiFi 7?

Промисловості 4.0 - мільйони промислових пристроїв IOT;

Дослідникам завтрашнього дня - найсучасніші технології;

Підприємцям, орієнтованим на майбутнє - більш ефективний і плавний досвід роботи;

IT-операції підприємств - більш економічні та просунуті рішення;

Реформаторам способу життя - розумні будинки, надійні та потужніші домашні мережі;

Професійним технікам - вивчення та дослідження новітніх продуктів та технологій;

Геймерам - неперевершений ігровий досвід.

Технічні характеристики маршрутизаторів WiFi 7 [14]:

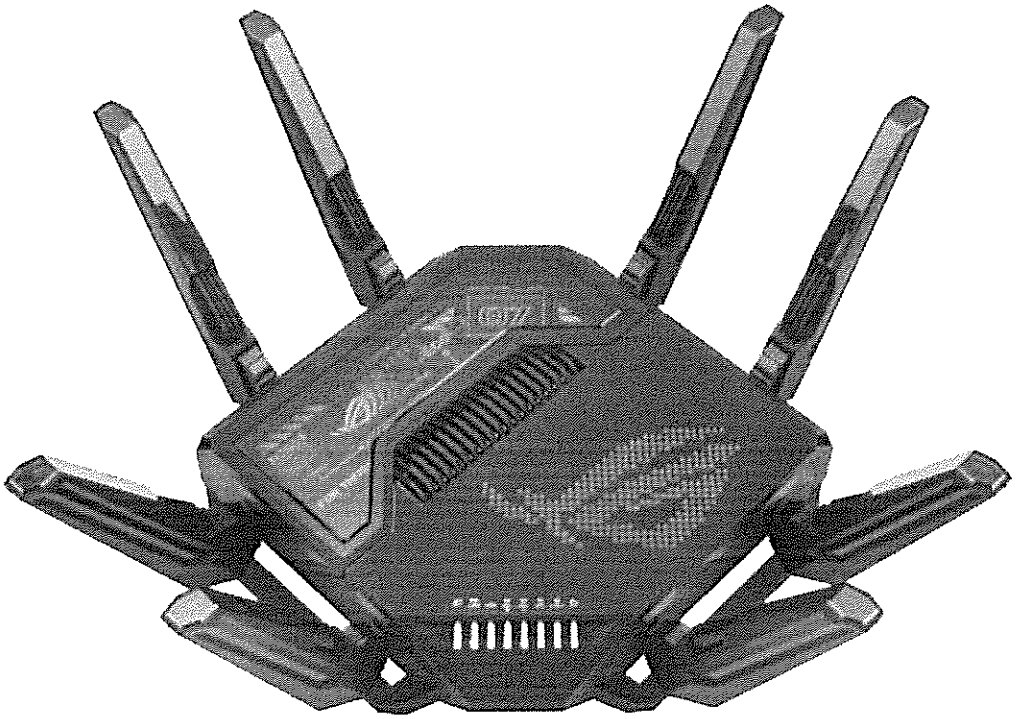


Рис. 1.13. Маршрутизатор ROG Rapture GT-BE98 Pro

Маршрутизатор ROG Rapture GT-BE98 Pro (рис. 1.13)

GT-BE98 Pro Quad-band Wi-Fi 7 (802.11be) ігровий маршрутизатор, підтримка нової смуги пропускання 320 МГц і 4096-QAM, подвійні порти 10G, резервна WAN, трирівневе прискорення гри, режим мобільної гри, AURA RGB, підтримка AiMesh, підписка- безкоштовна безпека мережі та комплексні функції VPN.

Надшвидкий WiFi 7 (802.11be) з новими каналами 320 МГц у діапазоні 6 ГГц і 4096-QAM значно збільшує пропускну здатність мережі зі швидкістю до 30 Гбіт/с. Швидкість передачі даних WiFi:

2,4 ГГц BE: 4x4 (Tx/Rx) 4096 QAM 20/40 МГц, до 1376 Мбіт/с,

5 ГГц BE: 4x4 (Tx/Rx) 4096 QAM 20/40/80/160 МГц, до 5764 Мбіт/с,

6G-1Hz BE: 4x4 (Tx/Rx) 4096 QAM 20/40/80/160/320 МГц, до 11529 Мбіт/с,

6G-2Hz BE: 4x4 (Tx/Rx) 4096 QAM 20/40/80/160/320 МГц, до 11529 Мбіт/с;

Процесор - чотирьохядерний 2,6 ГГц;

Пам'ять: 256 Мб Flash і 2 Гб оперативної пам'яті;

Підвищення швидкості: OFDMA (Множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів) Формування променя: засноване на стандарті та універсальне 4096-QAM, висока швидкість передачі даних, смуга пропускання 20/40/80/160/320 МГц;

Порти введення/виведення: 1 x 10 Гбіт/с для WAN/LAN 1 x 2,5 Гбіт/с для WAN/LAN 1 x 10 Гбіт/с для локальної мережі 3 x 2,5 Гбіт/с для локальної мережі 1 x RJ45 10/100/1000 Мбіт/с для локальної мережі 1 x USB 3.2 Gen1 1 x USB 2.0;

Multi-link Operation підключається до кількох діапазонів одночасно, щоб забезпечити стабільне підключення до Інтернету та ефективну передачу даних;

Сучасні зовнішні антени (зовнішня антена x 8) з подвійним живленням підвищують зону покриття, забезпечуючи високу ефективність і значно покращену потужність сигналу;

Максимальний дротовий зв'язок і гнучкість завдяки подвійним портам 10G і чотирьом портам 2,5G, що відкриває шлях для більшості ігор, що потребують пропускної здатності;

Захист мережі без передплати з комерційним класом AiProtection Pro на базі Trend Micro™, а також сканування безпеки одним дотиком і безпечний перегляд;

Комплексні функції VPN, включаючи розширену мережну мережу VPN і мобільний додаток Instant Guard для безпечного з'єднання через загальнодоступну мережу Wi-Fi;

Розширювані маршрутизатори AiMesh забезпечують безперебійний роумінг у всьому домі з багатими розширеними функціями;

Батьківський контроль;

Гостьова мережа;

Безпека: шифрування WiFi WPA/WPA2/WPA3 Personal WPA/WPA2/WPA3 Enterprise Open System & OWE WPS;

Адміністрування: резервне копіювання та відновлення конфігурації,

інструменти діагностики, система зворотного зв'язку, системний журнал, сповіщення про підключення нового пристрою, логін Captcha, діагностика підключення, автоматичне оновлення мікропрограми.

Ера Wi-Fi 7 тільки почалася. Представлена пропозиція — це лише проблиск справжньої потужності останнього випуску. З технологічної точки зору, випуск пристроїв Wi-Fi 7 є бажаним кроком. Однак, оскільки інтернет-провайдери та споживачі все ще дізнаються про весь потенціал Wi-Fi 6/6E, розгортання основного Wi-Fi 7 займе час, він може набрати значних обертів не раніше 2024 року.

2 СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ СИГНАЛУ

2.1 Створення моделі за допомогою інструментів управління AutoCAD

Метою роботи є створення моделі поширення сигналу в приміщенні офісного центру. Ці приміщення є кімнатами на 2 поверсі будівлі.

Існує безліч програмних засобів для моделювання тривимірних об'єктів, і кожен з них має своє конкретне використання. Найбільш підходящим для цієї роботи було обрано програмний пакет AutoCAD від Autodesk, головним чином з наступних причин:

- підходить для роботи з 2D-кресленнями та моделювання 3D-об'єктів,
- отриману модель можна експортувати у необхідні формати,
- завдяки студентській ліцензії це програмне забезпечення є абсолютно безкоштовним для некомерційних цілей.

Той факт, що опрацьовані креслення плану 2-го поверху будівлі, вже були доступні при виборі, так що не потрібно було робити креслення заново повністю.

На початку потрібно було досконально ознайомитися з кресленням підлоги і з'ясувати всі параметри та розміри. Після освоєння інструментів управління AutoCAD розпочалась робота над моделлю.

Спочатку креслення потрібно було перенести в простір тривимірного моделювання, що додає третій вимір осям x та y у вигляді осі z. Потім, використовуючи інструмент креслення, кладку витягнули на потрібну висоту. Знявши кладку, потрібно було вирізати в ній отвори для вікон та дверей, а потім помістити їх у отвори. Крім того, відповідно до периметру стін були створені та встановлені стелі.

Згодом зовнішній фасад був модифікований в оточенні перекриття (будинок D), що відрізняється від решти будівлі. На рис. 2.2 видно, що для простоти модель не містить меблів та інших предметів, які також впливають на поширення хвиль.

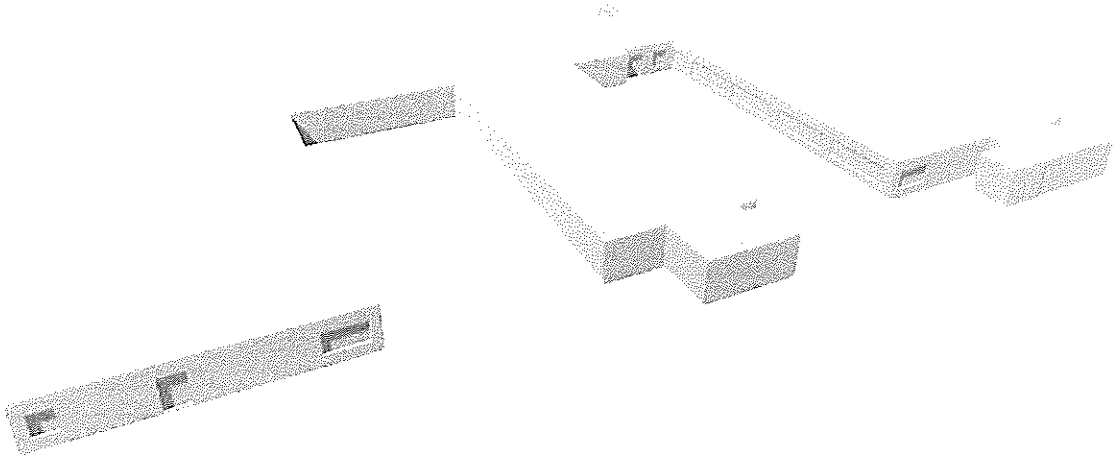


Рис. 2.1. Закрита 3D-модель 2 поверху

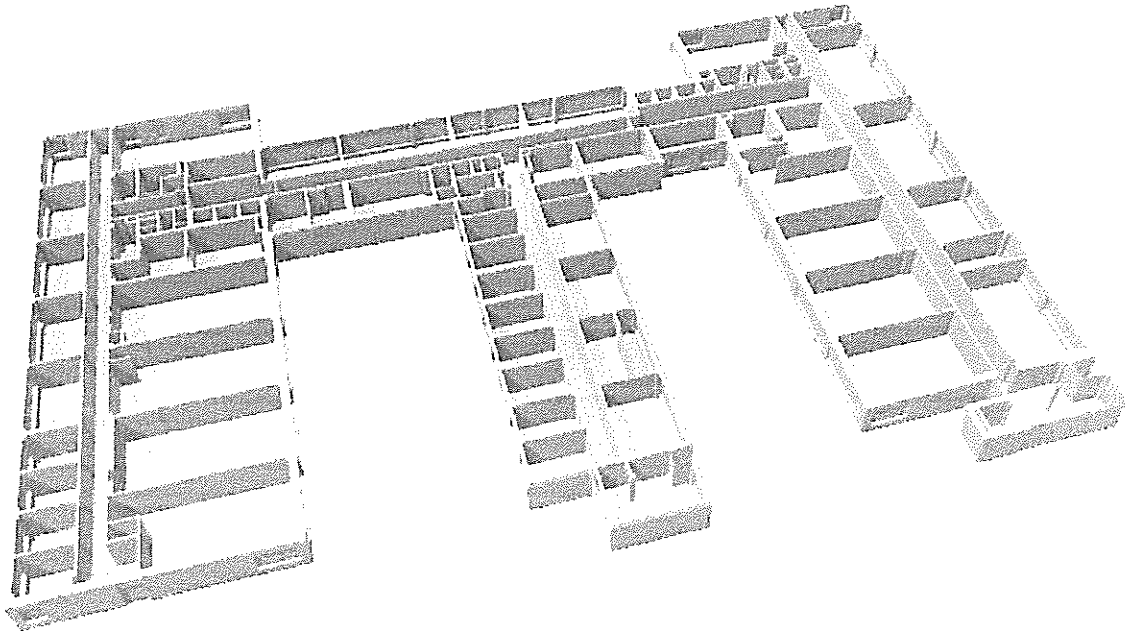


Рис. 2.2. Відкрита 3D-модель 2 поверху

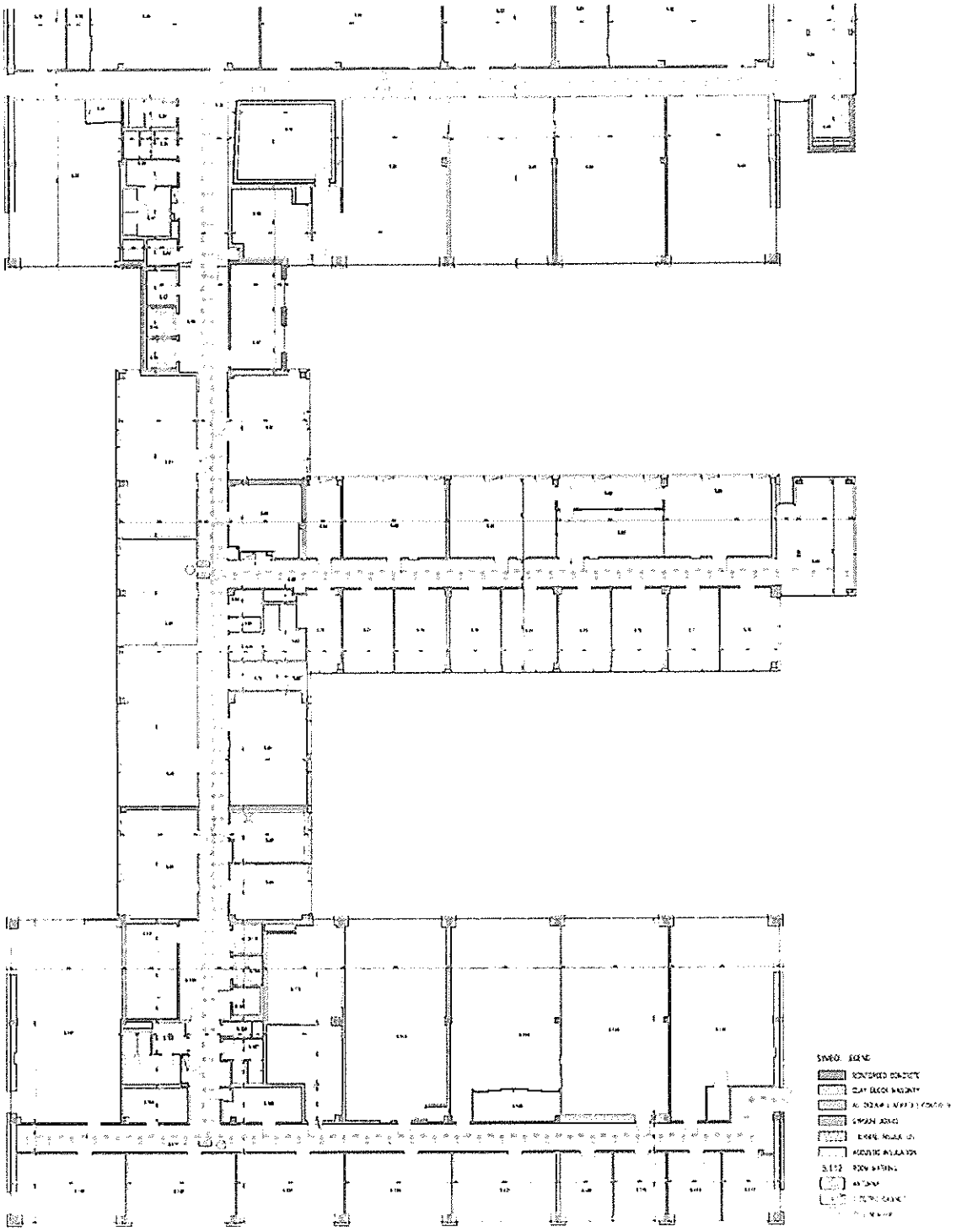


Рис. 2.3. План поверху 2 поверху будинку

Після моделювання об’єкт було експортовано у файл .stl, який також використовується для друку на 3D-принтерах.

2.2 Принципи моделювання розповсюдження хвиль

Для моделювання поширення сигналу зазвичай використовують три типи моделей:

- Емпірична модель - аналітична модель, заснована на реальних вимірах,

- Стохастична модель - характеризується використанням статистичних даних,

- Детермінована модель із використанням променів та решіток - детерміновані моделі базуються на рівняннях Максвелла та використовуються для конкретних випадків.

Для цілей цієї роботи детермінована модель видається найкращою, оскільки вона дана для середовища, на якому має відбуватися моделювання, і в той же час недостатньо даних для статистичної моделі чи інструментів для реального вимірювання та створення емпіричної моделі.

Модель, використана в роботі, використовує метод запуску променя для розрахунку поширення сигналу. На початку визначаються початкова і кінцева точки (передавач і приймач) та навколишнє середовище, які в даному випадку утворюють приміщення 2го поверху будинків.

Принцип дії алгоритму заснований на розрахунку шляху променів, які надходять від підсилювача і проходять через навколишнє середовище до приймача. Для найкращого моделювання власне хвиль електромагнітні хвилі замінюються прямими променями, що виходять від підсилювача. Чим більше кількість створених таким чином променів, тим точніший результат отримується згодом. Однак із збільшенням кількості пучків час моделювання та складність апаратних вимог до комп'ютерної станції також збільшуються. Тому цей факт слід врахувати перед початком моделювання.

В даний час у роботі використовується ідеалізований сферичний передавач, який здатний випромінювати однакові промені у всіх можливих напрямках.

Сама програма розділена на дві основні частини - фізичний блок, що використовується для всіх фізичних розрахунків, і геометричний блок, який визначає шлях поширення між антенами.

Фізичний блок складається в основному з методів, що займаються асимптотичними високими частотами, які засновані на теорії вигину та геометрії оптики. Як вже було описано у вступній частині роботи, якщо довжина хвилі електромагнітної хвилі в кілька разів менша за розмір навколишніх предметів, цю хвилю можна замінити прямими лініями. Завдяки цьому в цій роботі можна використовувати ідеалізовану сферу як передавач, який може посилати ці лінії в будь-якому напрямку. Щоб зберегти безперервність і симетрію, промені виходять із самого центру цієї сфери [12] (рис. 2.4).

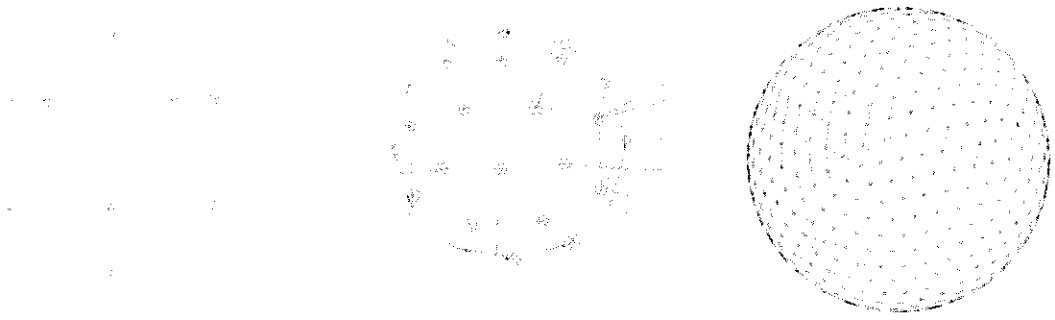


Рис. 2.4. Моделювання передавача у вигляді ідеалізованої сфери для випромінювання а) 12 пучків, б) 50 пучків, в) 1000 пучків [12]

Опис фізичного блоку

Усі розрахунки, що виконуються програмою, базуються на базових фізичних знаннях, що є загальним для інших подібних інструментів.

Ослаблення, яке виникає при поширенні сигналу через вільний простір - прямий шлях (LOS) від передавача до приймача, які відокремлені один від одного відстанню r - можна описати за допомогою рівняння Максвелла-Гельмгольца [12]:

$$E(r) = E_0 \frac{e^{-jkr}}{r}. \tag{2.1}$$

де P позначає хвильовий вектор, E0 - початкове електричне поле, що випромінюється антеною, виражене як:

$$E_0 = \sqrt{\frac{P_{TX} G_{TX} Z_0}{2\pi}}, \tag{2.2}$$

де PTX - випромінювана потужність у ватах, GTX вказує на коефіцієнт підсилення передавальної антени, а Z0 - на імпеданс вільного простору, який дорівнює 120π.

У момент, коли електричне поле Ei потрапляє на поверхню перешкоди, Er відбивається. Однак у момент удару це поле втрачає частину енергії. У програмі, що використовується в цій роботі, цей ефект описується коефіцієнтом Френеля Rgen [13]:

$$\begin{vmatrix} E_{\parallel}^{r} \\ E^{r} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{\parallel}^{gen} & 0 \\ 0 & R^{gen} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_{\parallel}^{i} \\ E^{i} \end{vmatrix}, \tag{2.3}$$

що може бути виражене наступним чином:

$$R_{\perp\parallel}^{gen} = R_{\perp\parallel} \left(1 - \frac{\left(1 - R_{\perp\parallel}^{2}\right) exp(-2\alpha s)\, exp(-2j\beta s)\, exp(jkd\sin(\theta))}{1 - R_{\perp\parallel}^{2} exp(-2\alpha s)\, exp(-2j\beta s)\, exp(jkd\sin(\theta))} \right). \tag{2.4}$$

де

$$R_{\perp} = \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\epsilon - \sin(\theta)^2}}{\cos(\theta) + \sqrt{\epsilon - \sin(\theta)^2}}, \tag{2.5}$$

і

$$R_{\perp} = \frac{\epsilon \cos(\theta) - \sqrt{\epsilon - \sin(\theta)^2}}{\epsilon \cos(\theta) + \sqrt{\epsilon - \sin(\theta)^2}}. \tag{2.6}$$

У рівняннях (2.4), (2.5) та (2.6) θ позначає кут падіння на поверхню та ε діелектричну проникність матеріалу. У рівнянні (2.4) α і β - коефіцієнти ослаблення, s - відстань, яку проходить хвиля всередині перешкоди, а d позначає зазор між двома сусідніми променями, викликаний внутрішніми відбиттями (рис. 2.5).

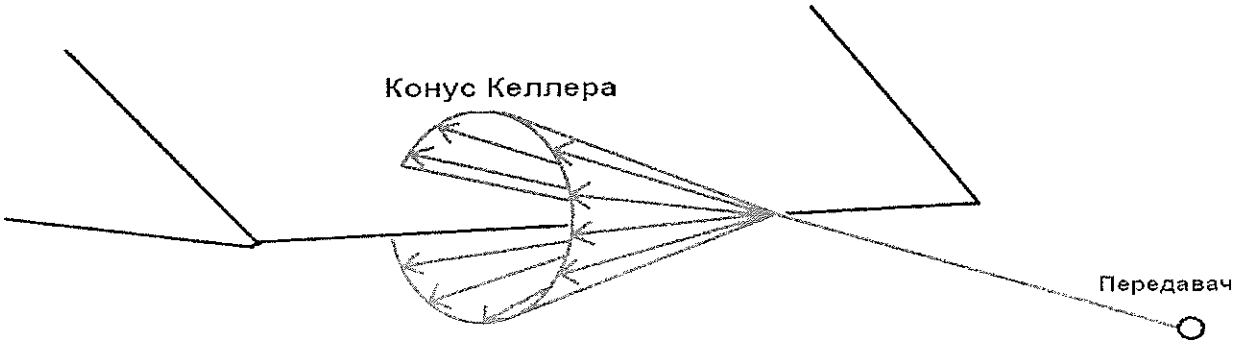


Рис. 2.5. Конус Келлера

Якщо промені б'ються об об'єкт меншого розміру, промінь буде згинатися або розсіюватися. У цій роботі вважається, що розсіювання відбувається при зіткненні променя зі стиком двох площин, взаємний кут яких не дорівнює 180°. Виходячи з цього факту, поле згинання Ed можна описати коефіцієнтами Dss, Dsh, Dhs і Dhh наступним чином [14]:

$$\begin{vmatrix} E_{\beta}^{d} \\ E_{\phi}^{d} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{ss} & D_{sh} \\ D_{hs} & D_{hh} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_{\beta}^{i} \\ E_{\phi}^{i} \end{vmatrix} \sqrt{\frac{r_{td} r_{dr}}{r_{td} + r_{dr}}} \frac{e^{-j\beta r_{dr}}}{r_{dr}}. \tag{2.7}$$

У рівнянні (2.7) rtd означає відстань від передавача до точки згину, rdr - відстань від точки вигину до приймача, а θ - хвильовий вектор.

Геометрично це явище можна описати так званим конусом Келлера, який

можна побачити на рис. 2.5.

Ослаблення сигналу в залежності від даної поверхні об'єкту моделюється за допомогою коефіцієнта

$$\rho = R_{\perp} exp\left(-8\pi^2 (\sigma/\lambda)^2 \cos(\theta)^2\right). \quad (2.8)$$

де rho, приймаючи значення від 0 до 1, - коефіцієнт шорсткості поверхні. Цей коефіцієнт враховує, крім нерівностей поверхні, нерівності стін будівель [15].

2.3 Отримані результати першого тестового моделювання

Результати першого тестового моделювання (WiFi 5 ГГц) можна побачити на рис. 2.6.

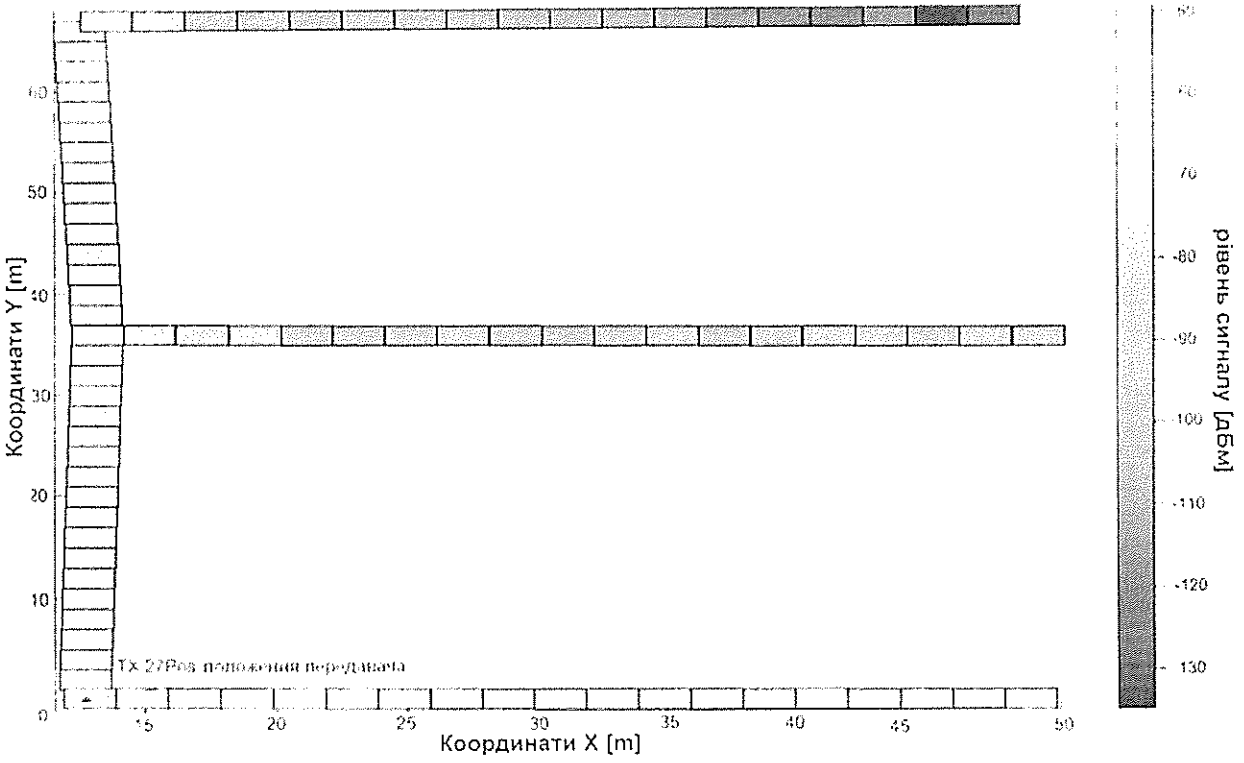


Рис. 2.6. Графічне зображення отриманих результатів

З отриманих даних видно, що зі збільшенням відстані приймача від передавача потужність сигналу зменшується, як це описано в теоретичній частині цієї роботи. Для цього розрахунку було розглянуто передавач потужністю передачі 1 мВт, який розміщений у куті будівлі (позиція 27), а для інших позицій розрахована потужність отриманого сигналу. Рівень прийнятого сигналу в дБм відображається кольорами від жовтого, що демонструє найбільшу потужність, до синього.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАНОЇ РОБОТИ

3.1 Мережевий симулятор NS-3

Початковим наміром цієї роботи було створити фреймворк в NS-3, який би використовувався для моделювання розповсюдження сигналу за допомогою створеної 3D-моделі. Після консультації з керівником було вирішено використовувати симулятор NS-3. Оскільки цю програму можна вільно розповсюджувати, її можна використовувати для робочих цілей та модифікувати за потреби.

Згодом було вирішено відмовитись від раніше розгляданої частоти 5 ГГц (WiFi), яку замінили частотою 6 ГГц. Ця зміна була зроблена головним чином завдяки вже існуючим настройкам тренажера для цієї частоти і в той же час завдяки існуванню результатів вимірювань у реальному середовищі на цій частоті. Таким чином, результати тренажера можна легко порівняти з реальними виміряними значеннями і, таким чином, з'ясувати відхилення теорії від практики. Ще однією причиною вибору частоти 6 ГГц стала підтримка стандарту IEEE 802.11ad, який зараз використовується на практиці.

NS-3 Simulator - це ліцензоване програмне забезпечення, що вільно розповсюджується, орієнтоване головним чином на наукові та навчальні цілі. Метою симулятора є створення та виконання імітацій у певному середовищі з використанням сучасних знань мережі. Він працює в дискретний час, що забезпечує більш швидкий процес моделювання (змінні різко змінюються і лише в тому випадку, якщо сталася певна подія, яка спричинила цю зміну). Моделювання сценаріїв у реальному часі було б занадто обчислювальним та трудомістким. Велика кількість програмістів у всьому світі бере участь у створенні вихідного коду не тільки з числа досвідчених експертів, а й звичайних користувачів, які також використовують симулятор [16].

Вихідний код самого симулятора написаний на C ++ та Python з можливістю використання скриптів. Для створення симуляцій використовується ряд модулів, створених для конкретних цілей, і можуть бути створені різні сценарії, що імітують реальне середовище. Після звужуються модулі включають, серед іншого, а також сценарії бездротового Wi-Fi, WiMAX або LTE з використанням динамічної маршрутизації для додатків на основі IP (Інтернет-протоколу).

NS-3 часто критикують за непідтримувані модулі, які підтримуються попередньою версією симулятора, NS-2. У той же час це також не допускає зворотного руху сумісність з попередньою версією і вимагає багато часу для розуміння та вивчення, порівняно з тренажерами, що використовують графічний інтерфейс користувача [16].

Незважаючи на ці недоліки, він був визнаний задовільним для цілей цієї роботи.

Модель просування хвилі 4,2 мм для NS-3

Зростаючі вимоги до бездротової передачі даних, разом із недостатнім використанням частотного спектру, дають привід шукати нові діапазони передачі, які можуть бути використані для цих цілей. Однією з можливостей використання попиту є використання міліметрових хвиль. Модель mmWave надає можливість використання лише міліметрових хвиль і, таким чином, стає однією з багатьох технологій, які використовуються в безпроводових мережах 5G п'ятого покоління. Однак із появою нових технологій вирішуються нові виклики та проблеми. Зростаючий попит на бездротові технології спонукав дослідників і надалі досліджувати потенціал міліметрових хвиль, забезпечуючи привід для появи мереж п'ятого покоління. У той же час можна припустити, що міліметрові хвилі стануть основою для появи нових безпроводових мереж майбутніх поколінь [17].

Хоча передача міліметрових хвиль пов'язана з відносно високим загасанням, технології фізичного рівня у вигляді, наприклад, антен, здатних до адаптивного пристосування, здатні значно зменшити це послаблення, про що свідчать

вимірювання, проведені в реальному середовищі. Однак, перш ніж цю технологію можна буде ефективно використовувати на практиці на глобальному рівні, необхідно вирішити низку проблем. Особливо на шарах над фізичним рівнем і в самому ядрі мережі як такої. Наприклад, висока чутливість міліметрових хвиль до раптового утворення перешкод, швидше за все, вимагатиме більш швидкого переходу між сусідніми клітинами. Також протокол (протокол зв'язку TCP на транспортному рівні - протокол управління передачею) необхідно буде більш швидко адаптуватися до частих змін каналів , щоб уникнути виникнення заторів.

Моделювання в дискретний час в протягом багатьох років одним з найпотужніших інструментів, доступних для розробки нових протоколів і моделювання складних мереж. Наразі Simulator NS-3 надає широкий спектр комунікаційних протоколів, що використовуються в середовищі моделювання. Враховуючи вищесказане, це був вільний модель mmWave, який використовується для моделювання поширення сигналу на фізичному рівні [17].

3.2 Модель імітаційного моделювання розповсюдження радіохвиль

Модель NS-3 mmWave орієнтований насамперед на імітацію мереж стільникового типу LTE і побудований на архітектурі модуля LTE LENA. Останнє важливо поліпшити його модель, реалізація точок доступу послуг, на яких мова пізніше в цій роботі. Як уже зазначалося, вихідний код модуля mmWave написаний на C ++. Весь модель складається із моделі просування та каналу, фізичного рівня та рівня MAC (частина лінійного рівня моделі ISO / OSI - Media Access Control). На рис. 3.1 показана діаграма UML (графічна мова - уніфіковані мови моделювання) найважливіших класів, що складають модель. Їх опис наведено в наступних розділах цієї роботи. Особливої уваги заслуговують класи MmWaveEnb-NetDevice та MmWaveUeNetDevice, які представляють базову станцію eNodeB (eNB) та користувальницьке обладнання користувача обладнання

(UE) відповідно приймач. Інші важливі класи MAC, MmWaveEnbMac та MmWaveUeMac, реалізують інтерфейси користувача та провайдера. Варто також згадати класи MmWavePhy, які забезпечують спрямовану передачу та прийом даних висхідної та низхідної ліній [17].

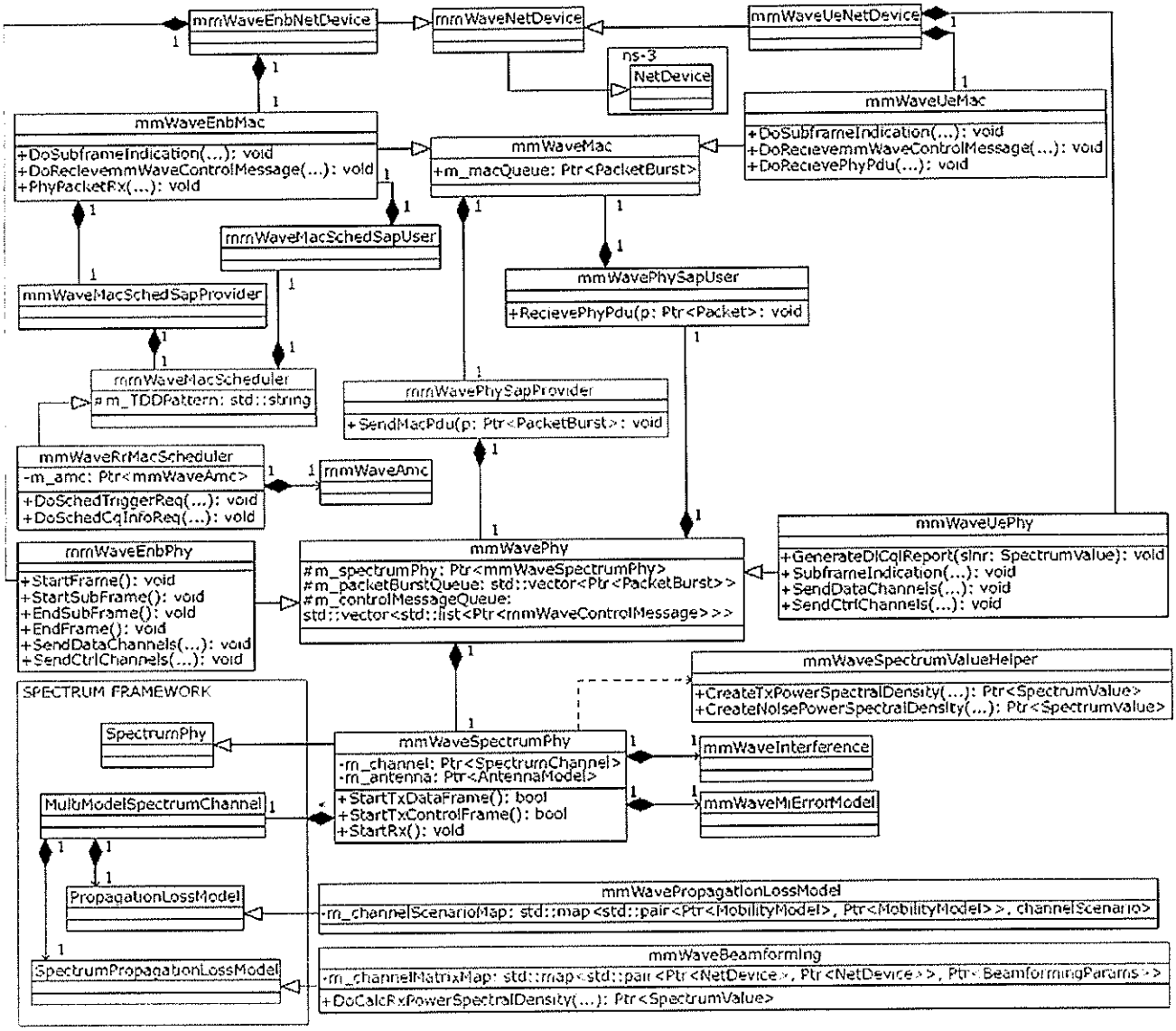


Рис. 3.1. Модель розповсюдження радіохвиль

Фізичний рівень моделі

Важливими елементами фізичного рівня модуля mmWave є:

- Повністю модифікований часовий дуплекс (TDD).
- Підтримка технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) поряд з

характеристикою радіо, яка дозволяє змінювати діапазон малого та великого каналів.

• Модель декодування помилок на стороні приймача.

• Модель перехресних перешкод.

• Цикл для адаптації каналу на основі зворотних корекцій.

Щоб зменшити затримку передачі інформації по повітрю, модулю mmWave потрібно буде використовувати дуплекс часу. З цієї причини він містить модель NS-3 з регулюванням Nym TDD. Кожен кадр має розділений на кілька підкадрів, які мають фіксовану довжину, зазначену користувачем. Кожен з цих підкадрів буде додатково розділений на кілька слотів, які знову мають фіксовану довжину. Потім кожен слот містить певний символ OFDM (Ортогональне мультиплексування з частотним поділом). Слот може містити або керуючу інформацію, або дані для висхідної або висхідної лінії зв'язку [18].

На рис. 3.2 наведено приклад структури кадру TDD. Кожен кадр 10 мс розділений на 10 підкадрів тривалістю 1 мс. Потім кожен підкадр далі поділяється на 8 слотів, кожен слот має довжину 125 пс. У цьому випадку окремі слоти представляють 30 символів OFDM довжиною приблизно 4,16 пс. Перші два слоти призначені для управління низхідною лінією, відповідно. висхідна лінія зв'язку. Третій-п'ятий слоти призначені для передачі даних у напрямку низхідній лінії зв'язку, а решта слотів (5-8) для висхідної лінії зв'язку. Кожного разу, коли змінюється напрямок передачі (від висхідної лінії до низхідної, або навпаки), вставляється так званий комутаційний зазор в 1 нс. За частотою весь діапазон 2,16 ГГц розділений на 4 вихідні блоки. Кожен із цих блоків додатково розділений на 18 піддіапазонів шириною 30 МГц. Це створює загалом 72 піддіапазони для всієї смуги пропускання. У той же час кожен з цих піддіапазонів містить 48 піднесучих, що в даному випадку вказує загальну кількість елементів джерела NZP на слот:

$$N_{ZP} = 30 \times (48 \times 72) = 103680. \tag{3.1}$$

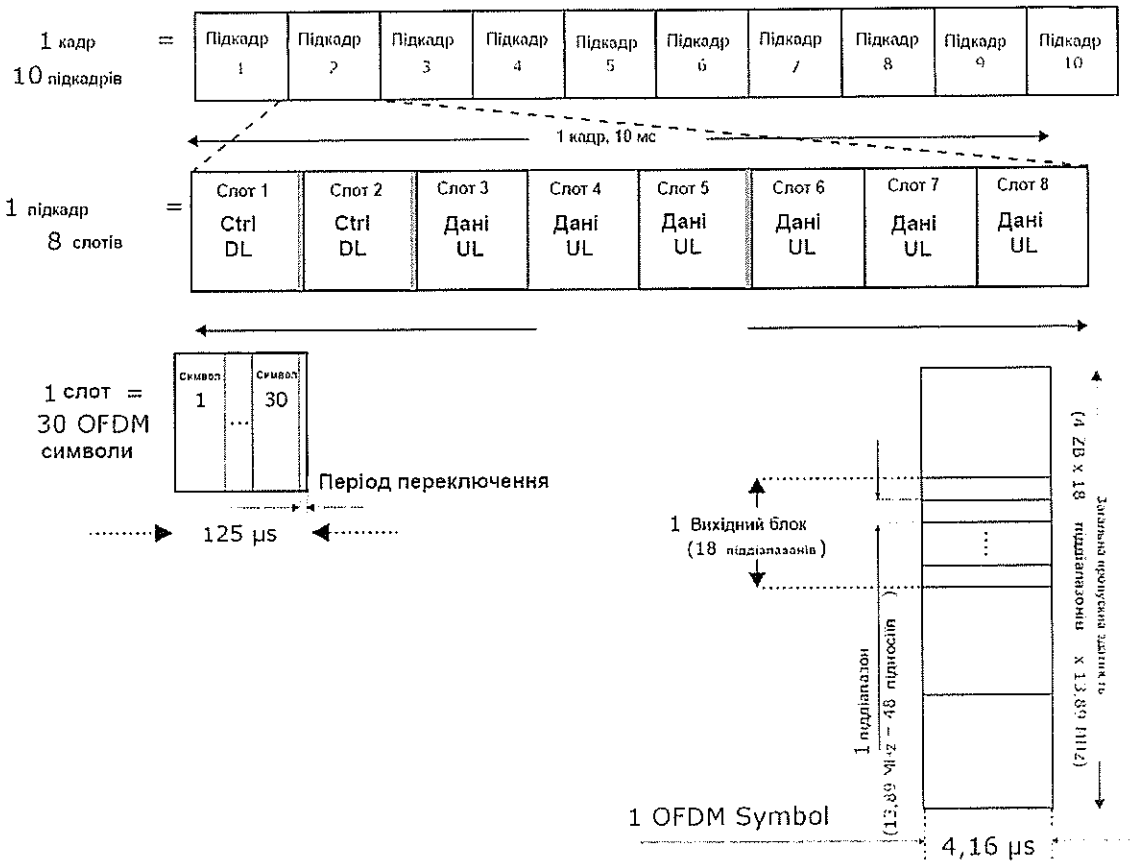


Рис. 3.2. Структура кадру в моделі mmWave [18]

Користувач може самостійно вибирати структуру кадру. Усі вибрані користувачем значення зберігаються у класі mmwavePhyMacCommon. Приклад цих параметрів можна знайти в таблиці 3.1. Найважливіші параметри моделі включають, наприклад, TTI (Transmission Time Interval), який визначає довжину одного слота. Його можна отримати наступним чином:

$$\text{TTI} = \text{символи в слоті} \times \text{довжина символу}. \quad (3.2)$$

У вихідному коді моделі це робиться за допомогою функції mmwavePhyMacCommon:: Get TTI (). Як і TTI, можна отримати інші параметри. Одним з них є пропускна здатність одного вихідного блоку. Ми можемо отримати його наступним чином:

$$\text{BZB} = \text{Прохід на вихідному блоці} \times \text{Ширина Прохід}. \quad (3.3)$$

Подібно до TTI, це реалізовано функцією mmwavePhyMacCommon :: GetRBWidth (). Загальну пропускну здатність можна отримати:

$$BSP = BZB \times P \text{ Вихідні блоки.} \quad (3.4)$$

Це реалізовано функцією mmwavePhyMacCommon :: GetSystemBandwidth () [17].

Критичним для зв'язку через міліметрові хвилі є розрахунок коефіцієнта підсилення від декількох антен або поширення багатопроменевого сигналу. Модель для розрахунку втрат можна розділити на три стани: LOS, NLOS (блок між передавачем і приймачем - Non Line of Sight) і відмова. Модель завжди дотримується заданої процедури [18]:

1. Виходячи з відстані приймача від передавача, розраховується ймовірність існування кожного з цих станів.

2. Вибирається контрольне значення від 0 до 1, яке порівнюється з імовірністю кожної умови.

3. Якщо опорне значення нижче значення ймовірності стану LOS, вибирається стан LOS. Якщо опорне значення більше, ніж імовірність стану LOS і одночасно менше ймовірності стану NLOS, вибирається стан NLOS. В іншому випадку завжди вибирається відключення.

Через високі втрати на передачу доцільно використовувати більше антен з функцією направлення променя, щоб забезпечити прийнятну якість з'єднання. Для забезпечення надійного з'єднання механізм зворотного зв'язку є необхідною частиною модуля [18]. Для цілей цієї роботи зворотний зв'язок генерується функцією mmWaveUePhy.

Таблиця 3.1.

Параметри налаштування структури кадру [17]

Назва параметра	Значення за замовчуванням	Опис
SymbolPerSlot	30	Кількість символів OFDM на слот
СимволДовжина	3.16	Довжина одного символу OFDM у мкс
SlotsPerSubframe	8	Кількість слотів в одному підкадрі
SubframePerFrame	10	Кількість підкадрів в одному кадрі
NumReferenceSymbols	6	Кількість посилань на символи OFDM на слот
TDDControlDataPattern	"cddddddd"	Шаблон контролю (c) та даних (d)
ПіднесучіPerSubband	48	Кількість піднесучих на піддіапазон
ПіддіапазониPerRB	18	Кількість піддіапазонів на вихідний блок
Ширина піддіапазону	13,89	Ширина піддіапазону в МГц
NumResourceBlock	4	Кількість вихідних блоків на слот
CenterFreq	28	Несуча частота в ГГц

Шар MAC

Рівень MAC у структурі складається з класу mmWaveMac, який є базовим класом для функції mmWaveEnbMac для визначення параметрів передавача та функції mmWave-EnbMac для визначення параметрів приймача. Основна функція цього рівня - доставляти пакети даних, що надходять з вищих шарів, на фізичний рівень і навпаки.

На основі обміну інформацією між приймачем і передавачем за допомогою керуючих повідомлень mmWaveCqiReport розраховується найбільш підходяща схема модуляції та кодування для зв'язку між двома вузлами. Цей процес називається адаптивною модуляцією та кодуванням і реалізується таймером на стороні передавача. Під час цього обміну інформацією формується схема

модуляції та коду разом із розміром транспортного блоку, який може передаватися фізичним рівнем. Розмір транспортного блоку розраховується на основі загальної кількості піднесучих на вихідний блок, отриманих з параметрів, заданих користувачем, потім кількості символів на слот і кількості опорних символів, і слот.

Тут використовується 24-розрядний циклічний код надмірності [18].

Користувач вирішує, як виглядатиме дуплексна схема таймера, змінивши параметр "TDDControlDataPattern", див. табл.. 3.1. Слоти даних розподіляються рівномірно між слотами низхідної лінії зв'язку та висхідної лінії зв'язку, причому перша половина слотів даних виділяється для низхідної лінії зв'язку, а решта - для висхідної лінії зв'язку. Слоти, призначені для управління, присвоюються каналу управління для низхідної лінії зв'язку, відповідно. для висхідної лінії зв'язку. Ця схема мінімізує час перемикання між висхідною та низхідною лініями під час передачі даних.

Розподіл ресурсів на рівні частоти можна регулювати за допомогою параметра mmWavePhyMacCommon, як показано в таблиці 3.1. Таймер рівня MAC використовує простий алгоритм кругового обертання для виділення слотів даних висхідної та низхідної ліній. Усі частотні елементи в даному слоті присвоюються одному користувачеві. Використовуючи слоти управління, кожен користувач може спілкуватися зі станцією управління [19].

Точка доступу до служби

Точка доступу до служби - це інтерфейс між фізичним та рівнями MAC або між рівнем MAC і таймером рівня MAC. Зв'язок між MAC і фізичним рівнем за допомогою служби AP (Точка доступу) відбувається наступним чином [17]:

1. Індикація субкадра надсилається фізичним рівнем на рівень MAC на початку кожного слота. Індикація першого слота для даного підкадра починає синхронізацію для рівня MAC передавача. Подальші вказівки необхідні для правильної доставки даних на вищих рівнях.

2. Передавач забезпечує черги даних для кожного підключеного користувача, і в той же час для одного користувацького пристрою достатньо лише однієї такої черги. Виходячи зі схеми синхронізації та збережених ресурсів, необхідна кількість пакетів, що передаються рівнем MAC, надсилається на фізичний рівень.

3. Інформація про синхронізацію та джерело, отримана передавачем на рівні MAC, передається на фізичний рівень за допомогою повідомлення про розташування mmWaveResourceAl. Потім фізичний рівень надсилає це повідомлення всім підключеним користувачам, попереджаючи всі пристрої в розкладі.

3. На основі параметра SINR (Signal to No Terrain plus Noise Ratio) отриманих слотів даних фізичний рівень на стороні приймача обчислює CQI (Індикатор якості каналу) і передає його базовій станції в наступному контролері. На стороні передавача фізичний рівень отримує повідомлення управління mmWaveCqiReport і пересилає його на рівень MAC.

3.3 Результати моделювання розробленої моделі міліметрового діапазону (mmWave)

Результати моделювання за допомогою модуля mmWave були перевірені самими розробниками, використовуючи прості сценарії, коли розглядався один передавач і один приймач. Користувач знаходився на відстані 40 м від базової станції і рухався до меж комірки з постійною швидкістю 20 м / с. Встановлення параметрів моделювання відповідає значенням у табл. 3.1. Передавач у цьому моделюванні мав потужність передачі 30 дБм (1 Вт). Двічі проводили моделювання для виявлення розбіжностей між сценаріями NLOS та LOS [17]. Результати моделювання, виконаного виробниками модуля NYU, можна побачити на рис. 3.3 та 3.4.

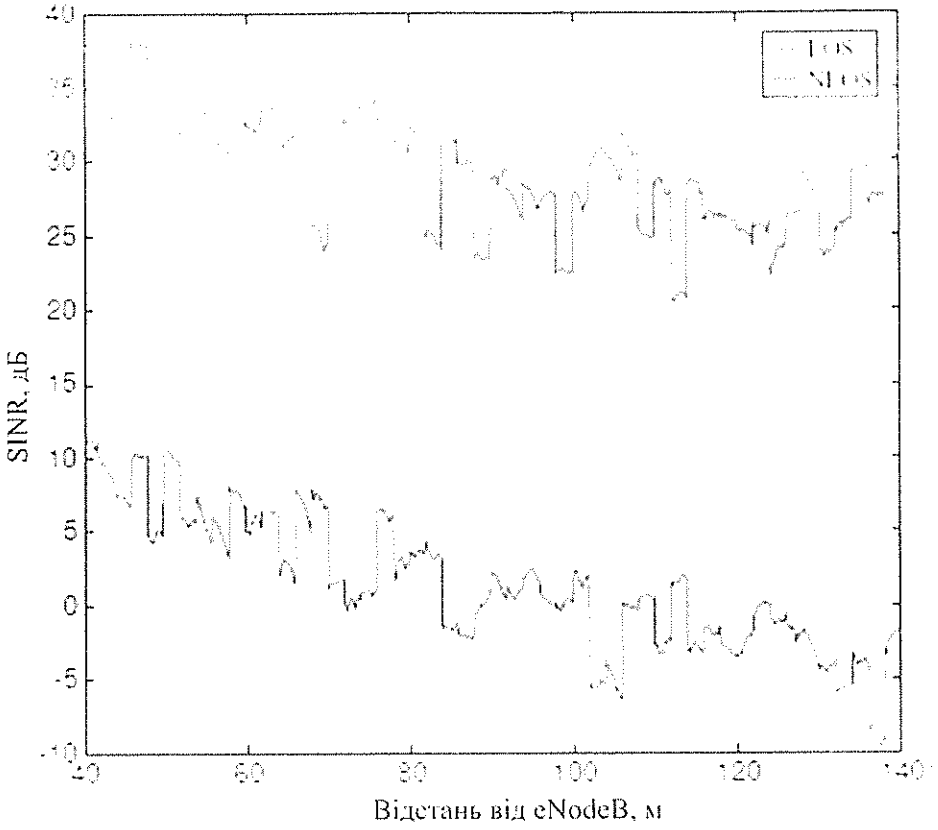


Рис. 3.3. Середнє значення SINR

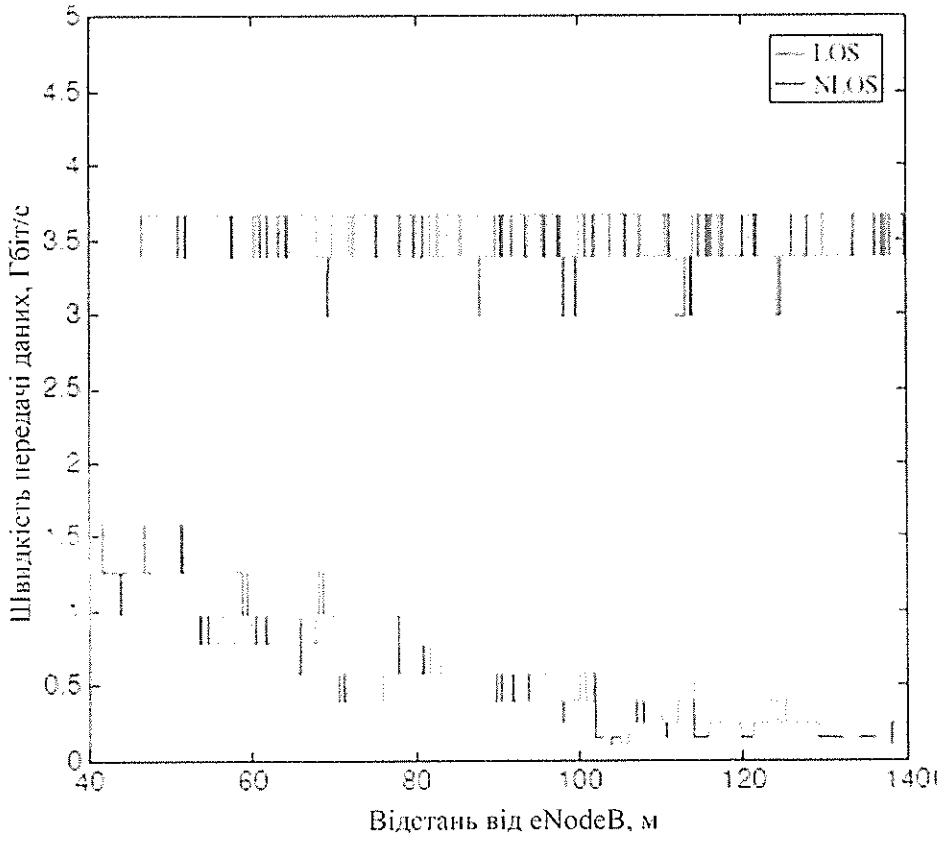


Рис. 3.3. Швидкість передачі даних користувача у сценарії LOS TA NLOS

4 ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ РОБОТИ

4.1 Опис використаної моделі

Темою практичної частини цієї роботи було виконати моделювання передачі даних у симуляторі NS-3, використовуючи модифікований модель mmWave під назвою NYUSIM. Модель в основному призначений для імітації стільникових мереж типу LTE, дозволяє використовувати діапазон частот від 6 до 100 ГГц та визначає чотири різні сценарії моделювання:

• Міський мікроелемент - імітує вулицю, оточену будинками, та базову станцію, розташовану нижче рівня даху.

• Urban Macrocell - у цьому випадку базова станція розташована над рівнем даху.

• Сільський макроелемент - цей сценарій орієнтований на імітацію просування за межами забудованої зони, відповідно. малонаселені райони.

• Офіс у приміщенні - використовується для імітації реального середовища всередині будівлі з базовою станцією, розташованою нижче рівня стелі [20].

Оскільки темою даної роботи є моделювання розповсюдження сигналу всередині будівель, було обрано сценарій Indoor Office, який забезпечує найбільш точні результати для цілей цієї роботи. Одночасно було обрано значення частоти імітованого сигналу 6 ГГц. Моделювання враховує один передавач та один приймач. Передавач закріплений у точці з координатами [0, 0] на висоті 1,5 м над підлогою. Приймач також розташований на висоті 1,5 м, і його координата x змінюється під час моделювання. Це імітує реальний рух користувача зі станцією. Огляд параметрів, використаних при моделюванні, можна побачити в табл. 4.1.

Темою моделювання було загалом три сценарії:

1. Моделювання на фізичному рівні.

2. Моделювання за допомогою протоколу TCP.

3. Моделювання за допомогою протоколу UDP.

Таблиця 4.1

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

Для цілей даної роботи симулятор запускався у віртуальній машині з 64-розрядною версією Ubuntu 16.04 з використанням засобу віртуалізації VMware Workstation 12. Гостьовий комп'ютер складався з ноутбука Lenovo Z580, з процесором Intel i5 2,50 ГГц, 8 ГБ оперативної пам'яті, Windows 10 64-біт.

Той факт, що симулятор працював у віртуальній машині, а гостьовий комп'ютер не є одним із найпотужніших обчислювальних пристроїв сьогодні, принципово відобразився на обчислювальному часі симулятора. Час обчислення окремих сценаріїв у деяких випадках досягав десятків хвилин, і через те, що для кожного сценарію необхідно було виконати моделювання з майже сорока кроків, на отримання досягнутих результатів знадобилося кілька днів.

Віртуальна машина для цілей моделювання включала інструмент Eclipse neon.2 для модифікації вихідного коду модуля. Потім є папки з самим модулем mmWave та інструментами управління файлами. В іншому випадку це був стандартний дистрибутив Ubuntu з базовим програмним забезпеченням.

Наступні файли, зокрема, були ключовими для отримання необхідних результатів:

• mmwave-tcp.cc

• mmwave-udp.cc

• mmwave-fymac.cc

• mmWaveAttributesList.txt

Файл mmwave-tcp.cc містить вихідний код, що використовується для встановлення параметрів та виконання фактичного моделювання сценарію для протоколу TCP. Подібним чином файли mmwave-udp.cc та mmwave-fymac містять код сценаріїв для моделювання трафіку даних відповідно до протоколу UDP. на фізичному рівні. Усі ці файли містять значну кількість змінних та констант, що впливають на хід та результат моделювання. Найбільш важливими параметрами, спільними для цих сценаріїв, є:

Conf ig :: SetDefault ("ns3 :: MmWaveUePhy :: TxPower", DoubleValue (16));

Conf ig :: SetDefault ("ns3 :: MmWaveEnbPhy :: TxPower", DoubleValue (16));

для регулювання потужності антен, а потім

подвійна зупинкаTime = 2;

// Тривалість моделювання в секундах.

Conf ig :: SetDefault ("ns3 :: MmWave3gppPropagationLossModel ::

Частота ", DoubleValue (6e9));

// Встановлення необхідної частоти, в нашому випадку 6e9 = 6ГГц.

Conf ig :: SetDefault ("ns3 :: MmWave3gppPropagationLossModel

:: Сценарій ", StringValue (" InH -OfficeOpen "));

// Вибір сценарію внутрішнього офісу.

mmwaveHelper -> SetAttribute ("PathlossModel", StringValue

("ns3 :: MmWave3gppPropagationLossModel"));

// Вибір моделі просування.

mmwaveHelper -> SetAttribute ("ChannelModel", StringValue (

"ns3 :: MmWave3gppChannel"));

// Вибір режиму каналу.

enbPositionAlloc -> Додати (Вектор (0,0, 0,0, 1,5));

// Налаштування положення передавача по осях x, y, z. uePositionAlloc -> Додати (Вектор (19. 5, 0.0, 1.5)); // Встановлення положення приймача по осях x, y, z.

Файл mmWaveAttributes.txt містить список моделей, які можна використовувати для моделювання. Для кожного сценарію можна вибрати з ряду запропонованих моделей, і, отже, можна виконати моделювання відповідно до наведених теоретичних припущень. Всі ці файли додаються у додатку до цієї роботи.

Для отримання необхідних результатів потрібно було в першу чергу відрегулювати положення приймача , тобто параметр uePositionAl loc, де відстань від передавача, тобто вісь X, змінювалася у значеннях від 1,5 м до 20 мс з кроком в 0,5 м. Для відстаней менше 1,5 м і більше 20 м, тренажер перестає працювати повністю коректно, тому ці значення в роботі не враховуються. У сценарії, що імітує роботу протоколу UDP, крім відстані передавача від приймача, потрібно було змінити параметр інтервалів пакетів, який визначає, в яких інтервалах протікають пакети. У той же час вам довелося вручну встановити значення схеми кодування (MCS) для обраної моделі. Для сценаріїв TCP та фізичного рівня ці параметри встановлювались автоматично. При моделюванні роботи на фізичному рівні необхідно було збільшити потужність передачі антен з параметрами ns3 :: MmWaveUePhy :: TxPower та ns3 :: MmWaveEnbPhy :: TxPower до 23 дБ через недостатню потужність і, отже, незадовільні результати.

Отримані в результаті моделювання значення зберігалися у файлі RxPacketTrace.txt, структура якого відповідає табл. 4.2.

Перший стовпець вказує напрямок передачі даних, тобто або висхідну, або низхідну. У другому стовпці - номер переданого кадру, за яким слідує кількість підкадрів. Третій стовпець містить позначення першого символу кадру, а наступний стовпець вказує загальну кількість символів. Інші стовпці містять

номер комірки, розмір переданих даних у бітах, схему кодування, отримане значення SINR.

Таблиця 4.2

Приклад значень, отриманих із файлу RxPacketTrace.txt

(лише перші 4 рядки)

	кадр	subF	1-йСим	символ #	cellId	tbSize	мкс	рв	SINR (дБ)
DL	16	6	1	22	1	1131	0	0	44.4994
DL	16	7	1	11	1	567	0	0	44.5001
UL	16	7	12	11	1	567	0	0	45,7706
DL	16	8	1	11	1	567	0	0	44.5007

З отриманих таким чином результатів особливо важливими були значення SINR, кількість кадрів та обсяг переданих даних. Потім швидкість передачі даних сценарію визначається відношенням.

$$T = \frac{tbSize \cdot 8}{t_f}. \tag{4.1}$$

Де tbSize – розмір переданих даних в одному кадрі (див. табл. 4.2), а tf – час передачі одного кадру і отримується як

$$t_f = \frac{t_s}{N_f}. \tag{4.2}$$

Де ts позначає час моделювання, а Nf - загальну кількість переданих кадрів. Потім отримане значення T вказує пропускну здатність в гігабітах за секунду - Гігабіт за секунду (Гбіт / с). Отримавши значення швидкості передачі бітів для всіх кадрів даного сценарію, розраховували середню швидкість передачі даних для всього сценарію, а потім це значення наносили на графік для кращої

ілюстрації. Отримані графіки для всіх трьох сценаріїв подані в кінці цієї роботи.

Оскільки значення SINR вже були розраховані симулятором, їх не потрібно було обробляти далі, і знову було визначено лише середнє значення для даного сценарію, яке також було записано на окремому графіку.

4.2 Результати проведених моделювань

Результати проведених моделювань за вже згаданими сценаріями можна спостерігати на рис. 4.1 - 4.6, які охоплюють графіки отриманих значень.

Графік 4.1 показує залежність пропускної здатності TCP від відстані. З графіку видно, що зі збільшенням відстані приймача від передавача пропускна здатність зменшується. Приблизно на відстані близько 5 м від передавача приймач показує приблизно однакове значення пропускної здатності, незважаючи на зміну відстані та зменшення значення SINR, що можна спостерігати на рис. 4.2. Залежність починає виявлятися із значення приблизно 6 м. Цей факт обумовлений поведінкою самого модуля, і неможливо змінити ці результати якимось чином.

Недоліки модуля також пов'язані з різкими змінами значень проникності на відстанях 13 м і 15,5 м, де ці значення, незважаючи на теоретичні припущення, досить чітко виділяються серед натовпу.

На рис. 4.2 показана залежність значення SINR від відстані передавача від приймача. З графіку видно, що SINR зменшується із збільшенням відстані і досягає найменшого значення (приблизно 5 дБ) на максимальній відстані, тобто 20 м. Зменшення значень безперервне і відповідає теоретичним припущенням.

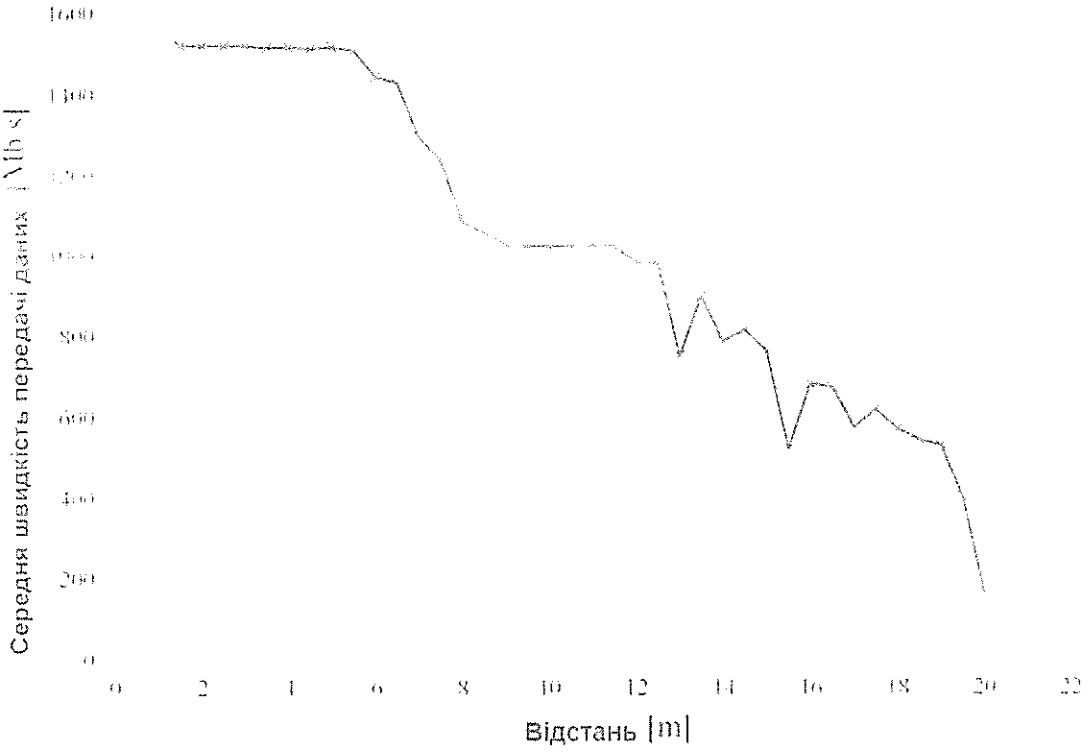


Рис. 4.1. Середня швидкість передачі даних TCP

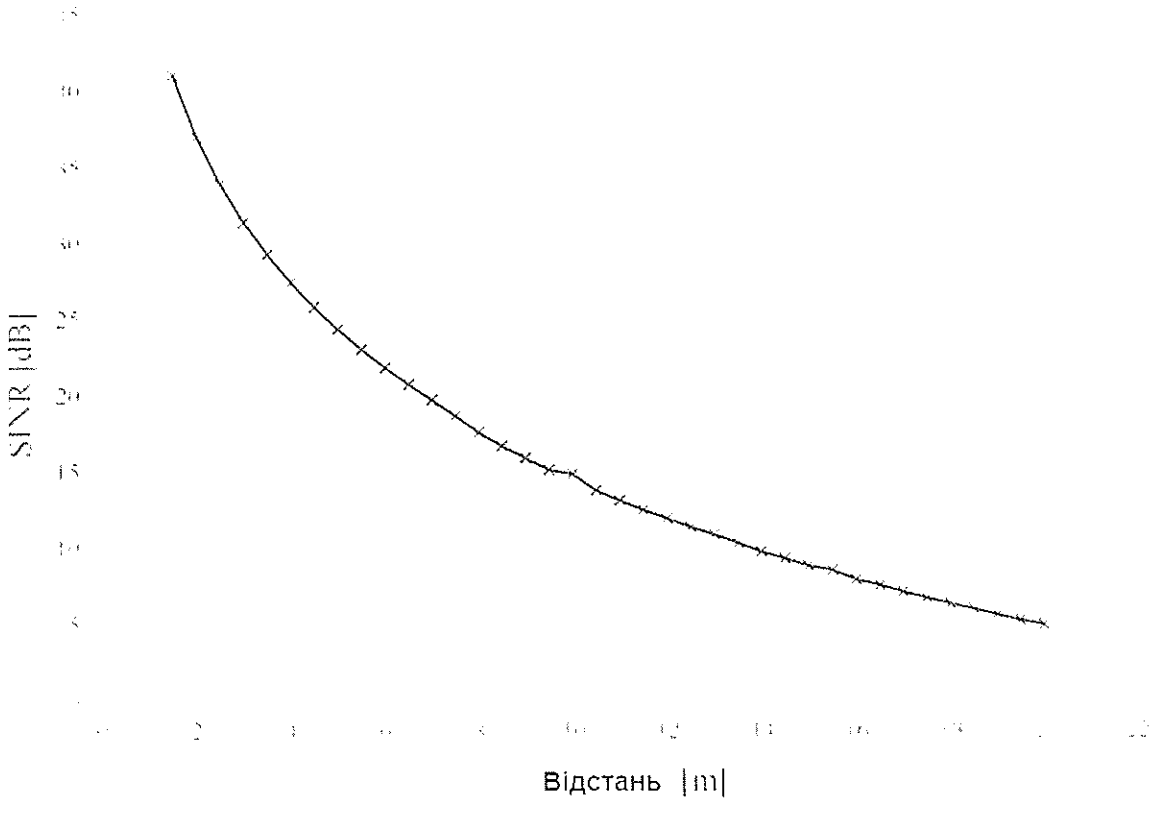


Рис. 4.2. Середнє значення TCP SINR

На відміну від TCP, сценарій UDP показує збільшення середньої швидкості передачі даних у всіх точках моделювання приблизно на 200 Мбіт / с. З графіку 4.3 видно, що хід отриманих значень подібний, але зменшення є досить лінійним, і отримана крива не містить занадто великих коливань значень. Як і у випадку із сценарієм TCP, той факт, що перші приблизно п'ять метрів не змінює значення швидкості передачі даних.

Отриманий графік значень SINR у сценарії протоколу UDP показує, що хід значень знову майже ідентичний, але самі значення принципово відрізняються. Порівняно зі сценарієм TCP, у всіх точках моделювання спостерігається збільшення приблизно на 20 дБ. Найвища точка графіка займає приблизно 61 дБ, найнижча 38,5 дБ. Точний хід можна спостерігати на рис. 4.4.

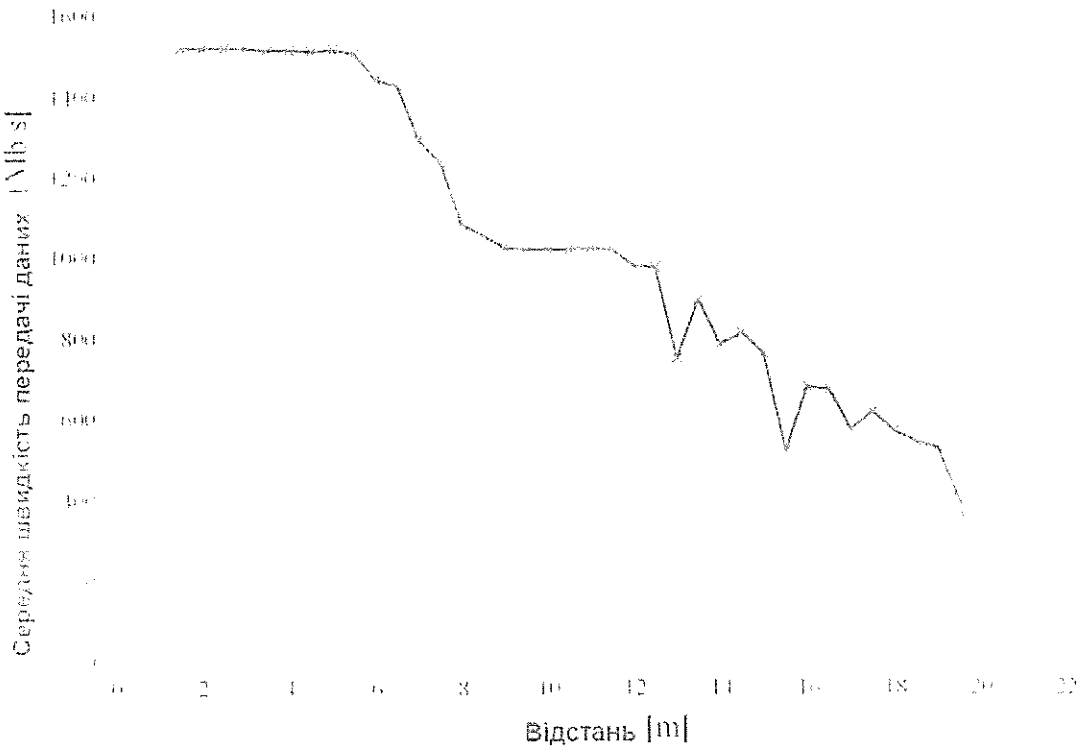


Рис. 4.3. Середня швидкість передачі даних UDP

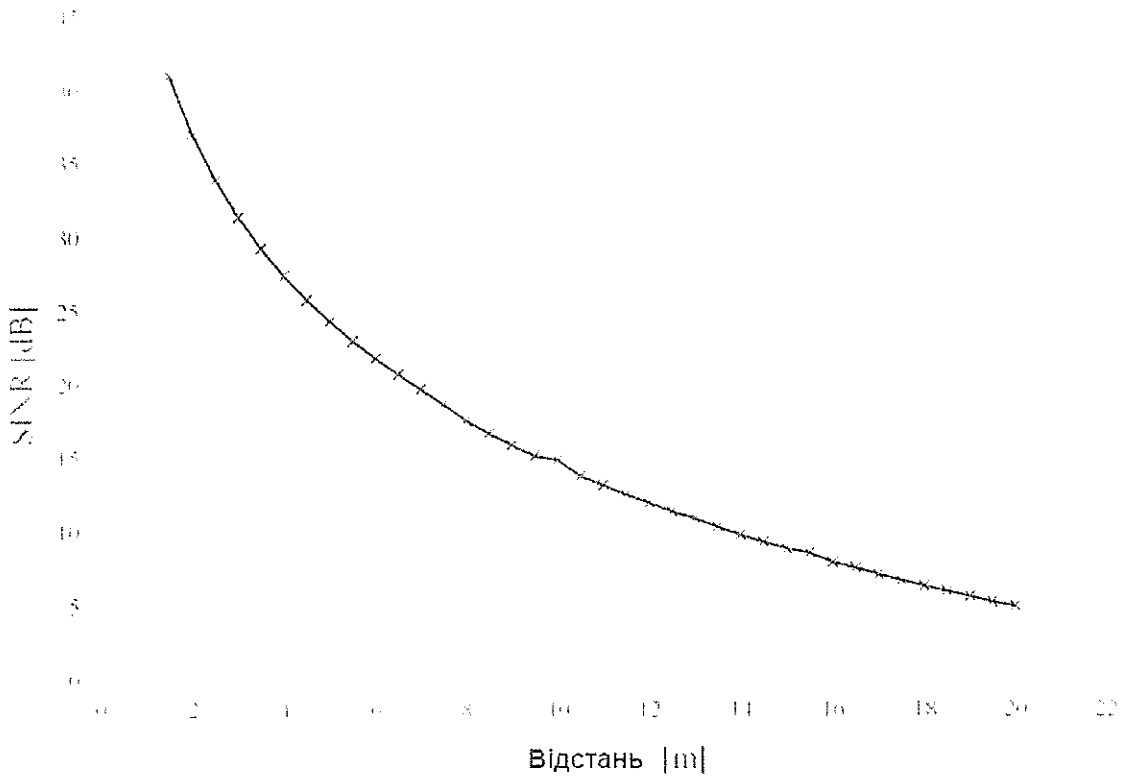


Рис. 4.4. Середнє значення SINR протоколу UDP

При моделюванні трафіку на фізичному рівні були знайдені зовсім інші значення швидкості передачі в порівнянні зі сценаріями з колесами TCP та UDP. Графік 4.5 показує, що виміряні швидкості майже вдвічі вищі, ніж у попередніх двох сценаріях. Напрямок руху на висхідній та низхідній лініях виділено на графіку для кращої наочності. Знову ж таки, може спостерігатися застій швидкості на перших кількох метрах і подальше зменшення лінійного характеру.

Хід значень SINR у сценарії моделювання фізичного рівня трафіку, зображеному на рис. 4.6, дуже схожий на сценарій TCP, навіть включаючи самі значення.

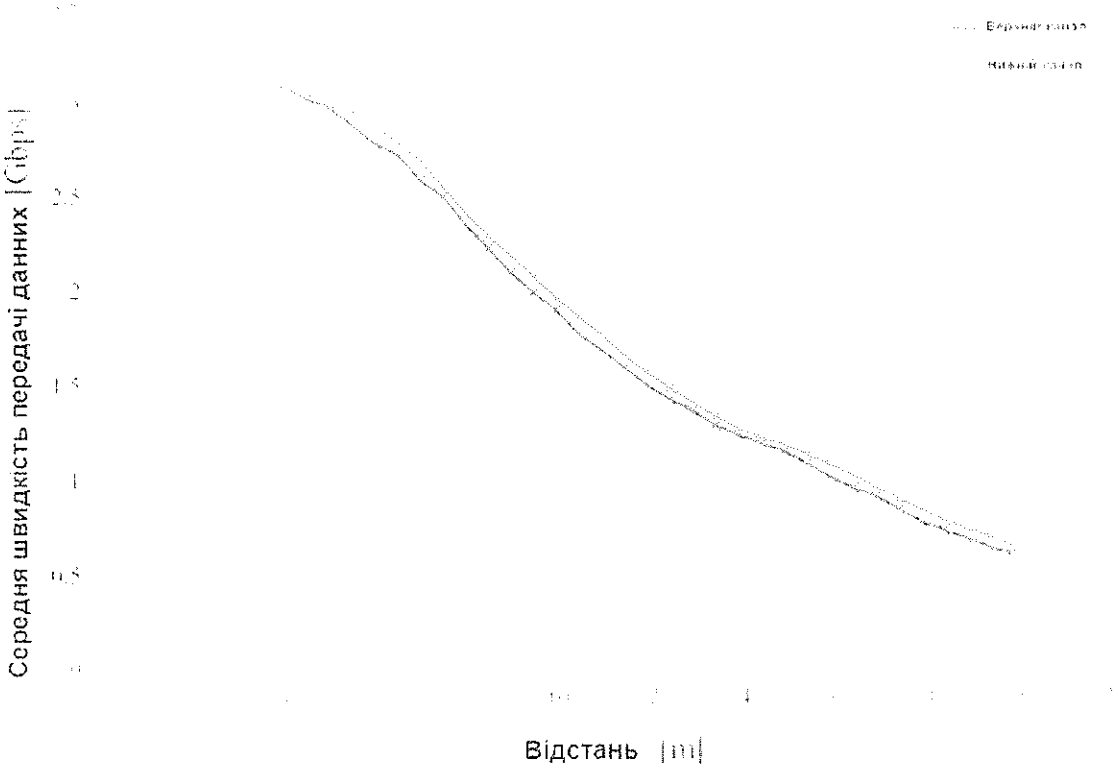


Рис. 4.5. Середня швидкість передачі даних на фізичному рівні

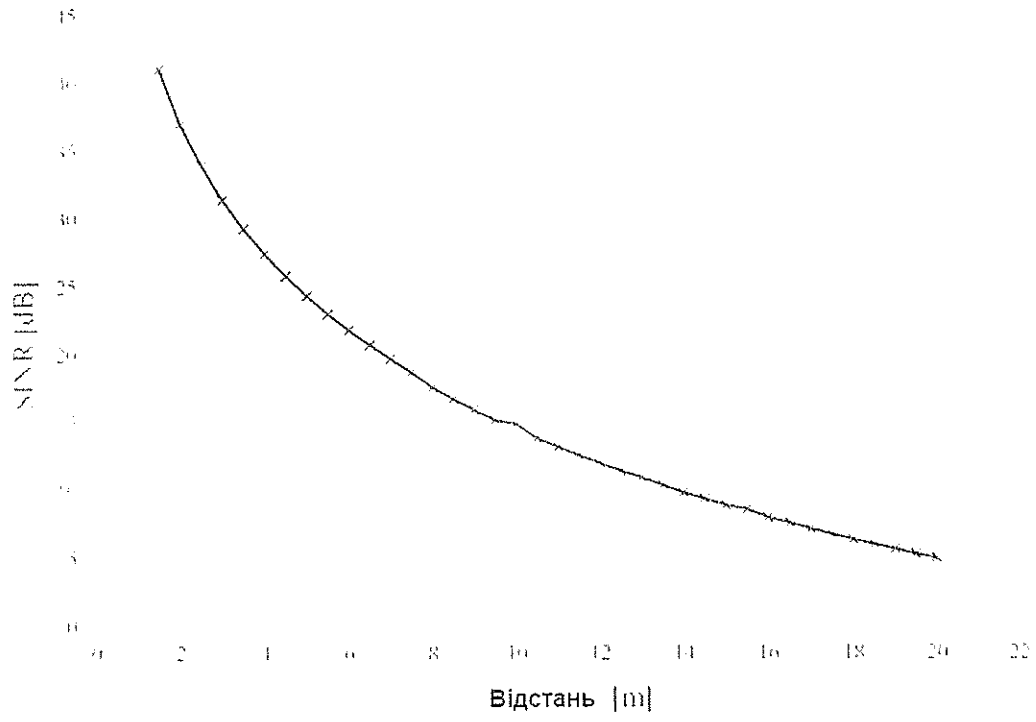


Рис. 4.6. Середнє значення SINR на фізичному рівні

Якщо той факт, що модель не завжди давав абсолютно правильні результати, ігнорується, і ми порівнюємо отримані значення з графіками значень, отриманих в результаті вимірювань у реальному середовищі, ми виявляємо, що вони дуже схожі. Таким чином, можна припустити, що моделювання може надати корисні дані, які відповідають реальним результатам.

4.3 Порівняння з результатами реальних вимірювань

Як згадувалося раніше в цій роботі, результати, отримані при моделюванні, можна порівняти з результатами, отриманими в результаті реальних вимірювань. Це вимірювання відбувалося в приміщеннях показаних на рис. 3.2 офісного центру, які послужили моделлю для створення 3D-моделі для цієї роботи.

Вимірювання базувалося на принципі клієнт-сервер, де сервер формував базову станцію і складався з настільного комп'ютера з модулем Dell DW1601, підключеним до слота Mini PCI Express. Цей модель підтримує WiFi (IEEE 802.11), що працюють на частоті 6 ГГц. З боку клієнта, тобто приймача, був ноутбук із бездротовою док-станцією Dell D5000. Ноутбук був підключений до станції за допомогою кабелю Ethernet категорії 6 для досягнення швидкості передачі даних до 1 Гбіт / с.

Для вимірювання на таких високих швидкостях передачі звичайного комп'ютера, мабуть, було б недостатньо для обробки даних, тому для вимірювання використовували потужну лабораторну машину. Параметри обох пристроїв можна знайти в табл. 4.3.

Таблиця 4.3.

Параметри використовуваного обладнання

	Базова станція	Користувацька станція
Операційна система	Windows 10 64-розрядна	Windows 10 64-розрядна
Материнська плата	Gigabyte B150M-D3G-CF	P65_P67RGRERA
Процесор	Intel Core i5 6500, 3,2 ГГц	Intel Core i7 6700HQ, 2,6 ГГц
Пам'ять	16 ГБ	32 ГБ
Модель 6 ГГц	DELL DW1601	Wilocity WIL6110

На рис. 4.7 - 4.9 показані результати виконаних моделювань та подальших вимірювань у реальному середовищі.

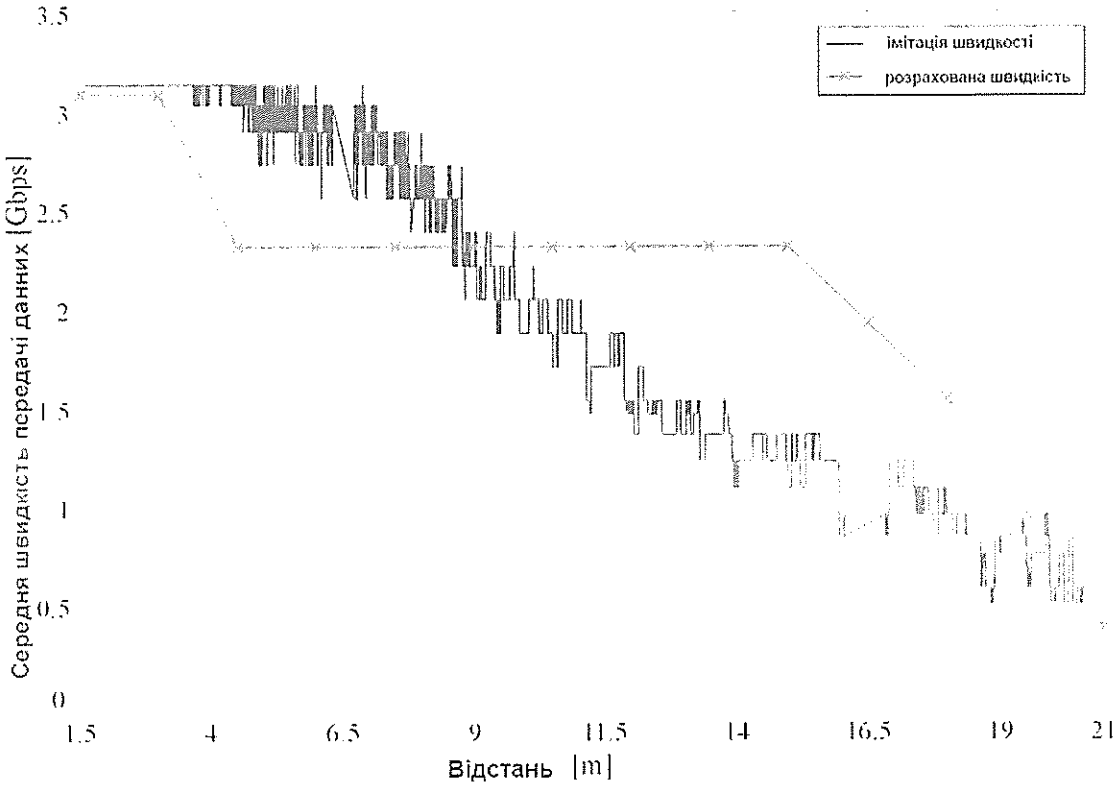


Рис. 4.7. Середня швидкість передачі даних на фізичному рівні

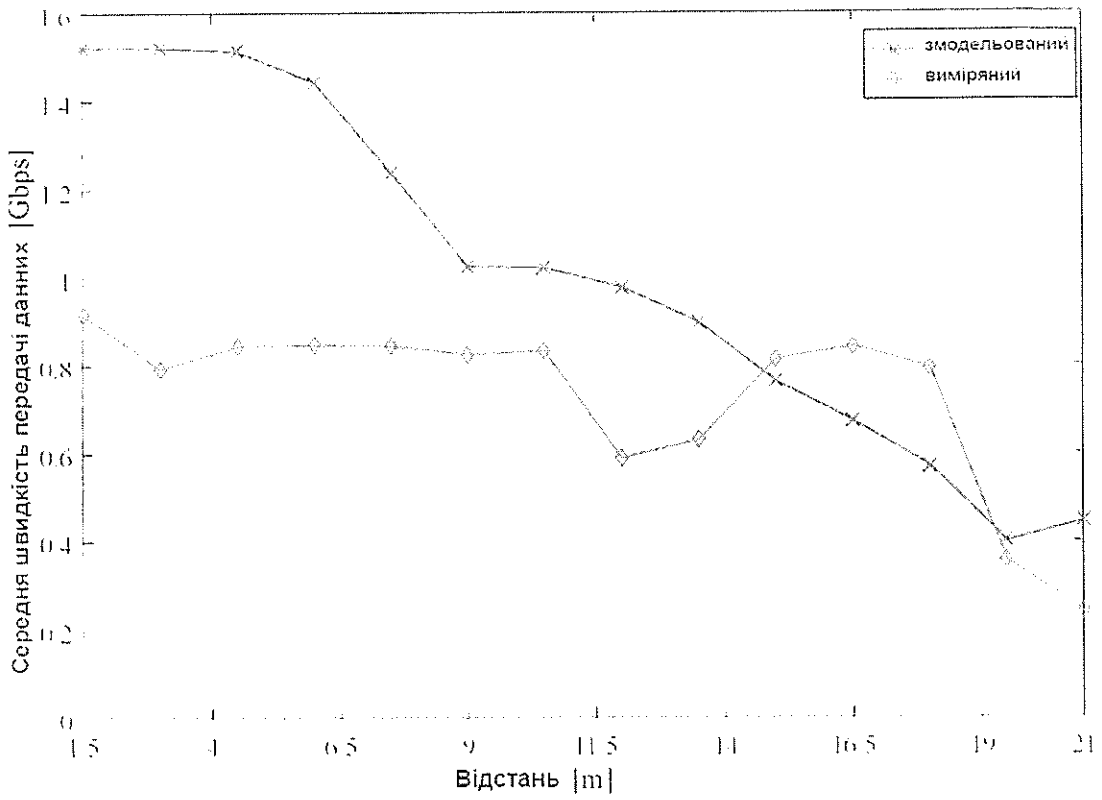


Рис. 4.8. Середня швидкість передачі даних TCP

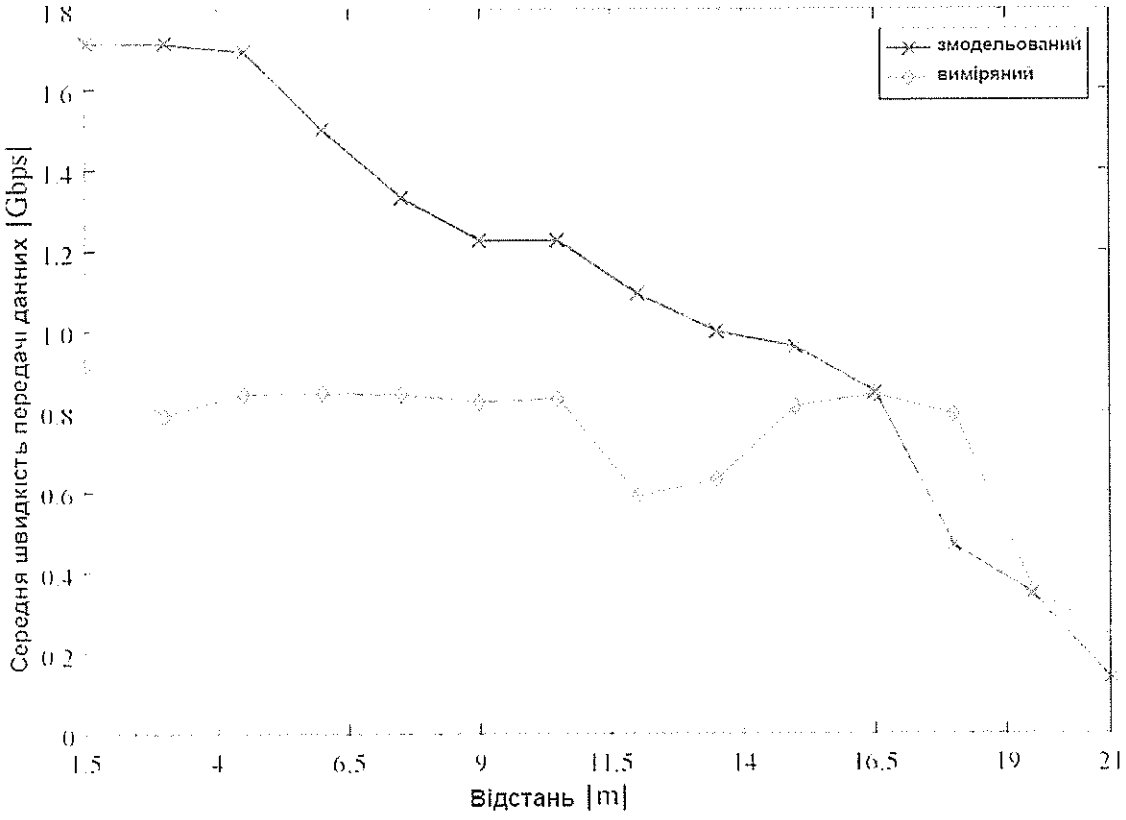


Рис. 4.9. Середня швидкість передачі даних UDP



Рис. 4.10. Обладнання, яке використовується для вимірювань у будівлі

На рис. 4.10 показано використовуване обладнання та область, де проводилося вимірювання.

На закінчення можна сказати, що результати проведених моделювань збігаються з результатами, отриманими в результаті вимірювань, навіть незважаючи на те, що імітаційна модель показує неточності. В основному це було пов'язано з тим, що ця модель не була в першу чергу розроблена для імітації сценарію «точка-точка» з одним передавачем та одним приймачем відповідно з одним передавачем та кількома приймачами, а скоріше для імітації стільникового розподілу системи LTE. Незважаючи на ці неточності, модель відповідає вимірюванням у реальному середовищі.

ВИСНОВКИ

Ця робота була написана з метою теоретичного аналізу та подальшої практичної реалізації можливості моделювання розповсюдження радіосигналів, особливо всередині будинків.

Вступна частина магістерської роботи присвячена теорії поширення електромагнітних хвиль у відкритому просторі та всередині будівель. Тут описані основні принципи поширення хвилі та явища, що відбуваються під час нього. Цей розділ також містить опис методів, за допомогою яких поширення електромагнітних хвиль може бути оцінено заздалегідь на основі розрахунків. Зокрема, тут описані методи запуску і трасування променів. У висновку частини викладено відмінності у розповсюдженні хвиль з різними частотами, особливо в діапазоні від 2 до 6 ГГц.

У другій частині роботи описується процес створення 3D-моделі простору офісного центру. Є обґрунтування обраного програмного забезпечення, опис ходу роботи над моделлю та проекція моделі 2 поверху простору офісного центру.

Наступна частина роботи містить опис алгоритму, який був використаний для практичного розрахунку поширення сигналу WiFi 5 ГГц у вже згаданих областях. Наведено формули, які використовувались для розрахунку, і результати, отримані в результаті розрахунків та подальшого моделювання, включаючи графічну обробку.

Четверта частина роботи містить опис мережевого симулятора (NS-3) і, перш за все, розроблену модель розповсюдження радіохвиль. Потім ця модель використовувався для імітації поширення сигналу для стандарту IEEE 802.11be, тобто WiFi7. Ця частина містить детальний опис моделі, включаючи її частини та, нарешті, результати моделювання. Висновки по розділу присвячено результатам, які були отримані під час цієї роботи. Це в основному опис вихідного коду моделі та використовуваних параметрів. Крім того, ця частина містить результати,

отримані в результаті моделювання. Ці результати побудовано на графіку для кращого огляду. В кінці цієї частини наводиться порівняння результатів, отриманих в результаті моделювання, з результатами вимірювань.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ahmadi S. LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies. – Academic Press, 2018. – 1152 p.

2. K. V. N. Bezawada, K. Shambavi and Z. C. Alex, "Design of reconfigurable antenna for LTE and WLAN applications", Communications and Signal Processing (ICCSP) 2013 International Conference on, 2020.

3. R.A. Abd-Alhameed, S.M.R. Jones, C.H. See, D. Zhou, N.J. McEwan, P.S. Excell, et al., "Planar monopole antennas for new generation mobile and lower band ultra-wide band applications", IET Microwaves Antennas & Propagation, 2021.

4. J. A. Ansari, A. Mishra, N. P. Yadav, Kamakshi and A. Singh, "Analysis of pair of L-shaped slot loaded patch antenna for WLAN applications", Power Control and Embedded Systems (ICPCES) 2018 international Conference on Conference, 2018.

5. 3GPP TS 36.101 E-UTRA: User Equipment (UE) radio transmission and reception [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.3gpp.org/DynaReport/36101.htm. (дата звернення: 12.10.2023)

6. The Evolution of Mobile Technologies: 1G 2G 3G 4G LTE [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.qualcomm.com/media/documents/files/the-evolution-of-mobile-technologies-1g-to-2g-to-3g-to-4g-lte.pdf. (дата звернення: 15.10.2023)

7. IEEE 802.11n advantage, Redpine Signals [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.redpinesignals.com/pdfs/Why11n.pdf. (дата звернення: 17.11.2023)

8. New IEEE 802.11ac Specification Driven by Evolving Market Need for Higher, Multi-User Throughput in Wireless LANs [Електронний ресурс] – Режим доступу:https://standards.ieee.org/news/2019/ieee_802_11ac_ballot.html. (дата звернення: 17.10.2023)

9. IEEE Std 802.11ac-2018 - 22.5 Parameters for VHT-MCSs [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2018.pdf. (дата звернення: 04.11.2023)

10. CSIROs greatest impact WiFi [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.engineersaustralia.org.au/sites/default/files/shado/News%20and%20Media/30_g_-_wi-fi.pdf. (дата звернення: 04.11.2023)

11. Internet users in the world [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.internetworldstats.com/stats.htm. (дата звернення: 08.11.2023)

12. 2019 USA - Telecoms, Wireless, Broadband and Forecasts [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.budde.com.au/Research/2019-USA-Telecoms-Wireless-Broadband-and-Forecasts.html?r =51. (дата звернення: 08.11.2023)

13. TP-Link. Що таке WiFi 7? Що пропонує WiFi 7? Кому потрібен WiFi 7? | Маршрутизатор TP-Link WiFi 7. TP-Link. URL: https://www.tp-link.com/uk-ua/wifi7/#4K-QAM (дата звернення: 05.11.2023).

14. U-WI-FI: Unlicensed Spectrum Utilization of WI-FI [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.huawei.com/ilink/en/download/HW_327803. (дата звернення: 05.11.2023)

15. Extending WI-FI Advanced to unlicensed spectrum [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.qualcomm.com/solutions/wireless-networks/technologies/Wi-Fi-unlicensed. (дата звернення: 05.11.2023)

16. 802.11-2012 - IEEE Standard for Information technology [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11-2012.html. (дата звернення: 05.11.2023)

17. WI-FI Industry Insight and Vendor Analysis [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.slideshare.net/zahidtg/Wi-Fi-industry-insight-and-vendor-analysis. (дата звернення: 09.11.2023)

18. WI-FI Release Description [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases. (дата звернення: 09.11.2023)

19. WI-FI [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-Wi-Fi. (дата звернення: 09.11.2023)

20. Scheduling in WI-FI [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.ece.drexel.edu/walsh/Gwanmo042712.pdf. (дата звернення: 10.11.2023)

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Презентація по магістерській роботі на тему:

Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7

Студента
Сержанського Станіслава Станіславовича

МЕТА РОБОТИ

Об'єктом дослідження є процес побудови моделі розповсюдження радіохвиль.

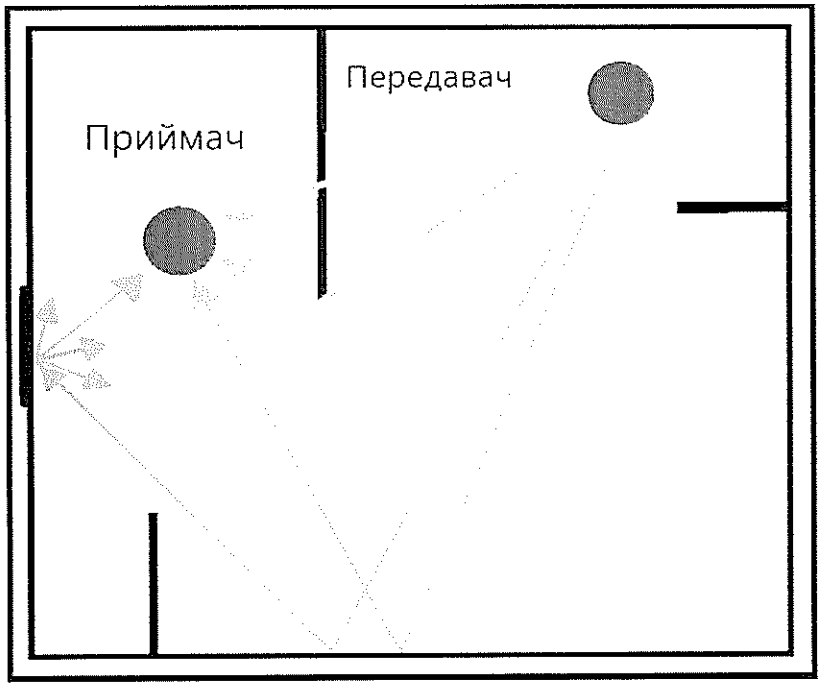
Предметом дослідження є методи розробки 3D-моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7.

Мета роботи. Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7 в середині будівлі офісного центру.

Порівняння показників поколінь Wi-Fi

	WiFi 5	WiFi 6	WiFi 6E	WiFi 7
Дата запуску	2013	2019	2021	**2024 (попередньо)**
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, 5 ГГц	2.4, 5, 6 ГГц	**2.4, 5, 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 (і вище)**
MIMO	4×4 MIMO DL MIMO	8×8 UL/DL MU-MIMO	8×8 UL/DL MU-MIMO	**16×16 UL/DL MU-MIMO**

Поширення багатопроменевого пучка хвиль



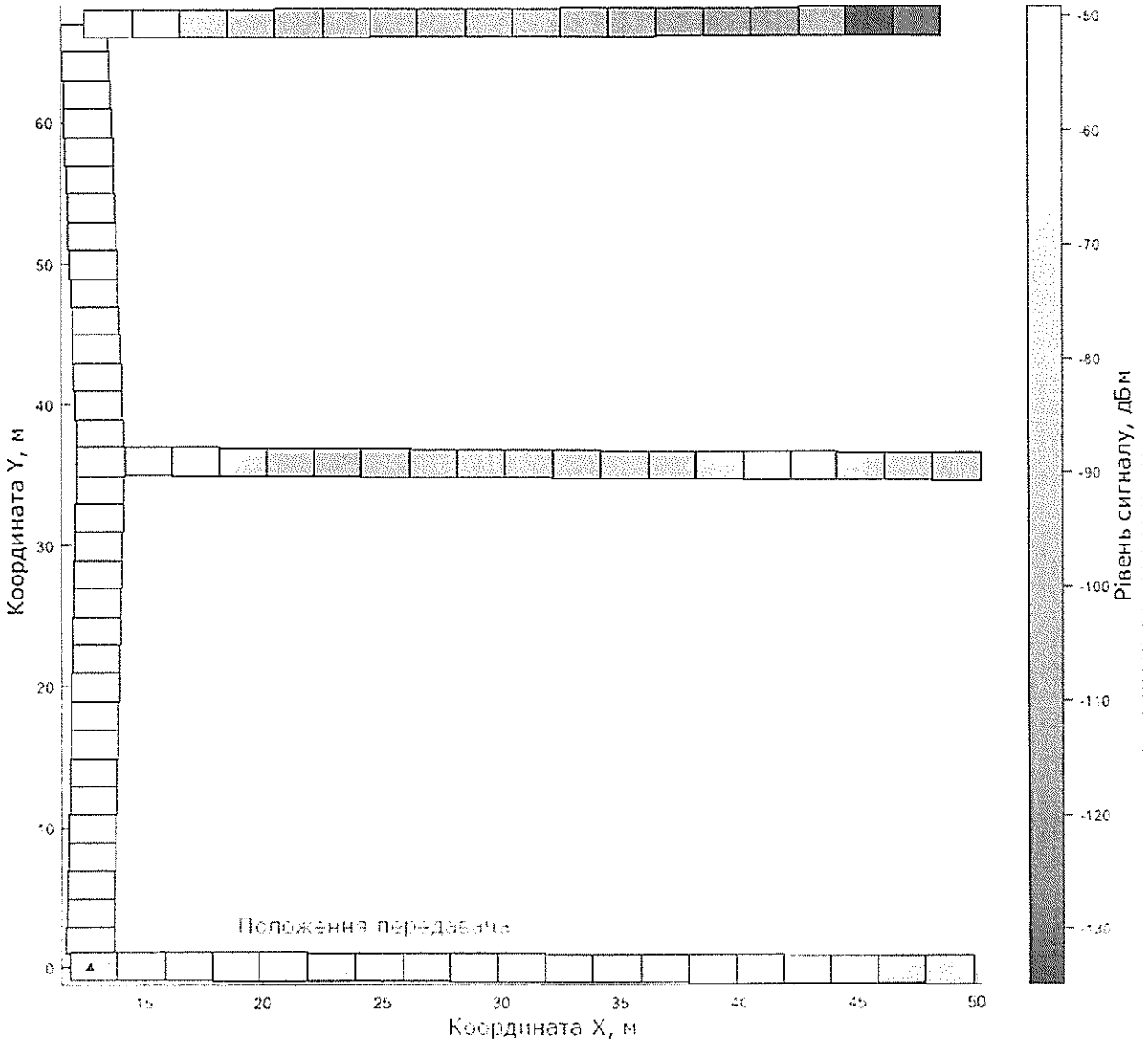
Принципи моделювання розповсюдження хвиль

Емпірична модель - аналітична модель, заснована на реальних вимірах.

Стохастична модель - характеризується використанням статистичних даних.

Детермінована модель використовуються для конкретних випадків

Отримані результати першого тестового моделювання



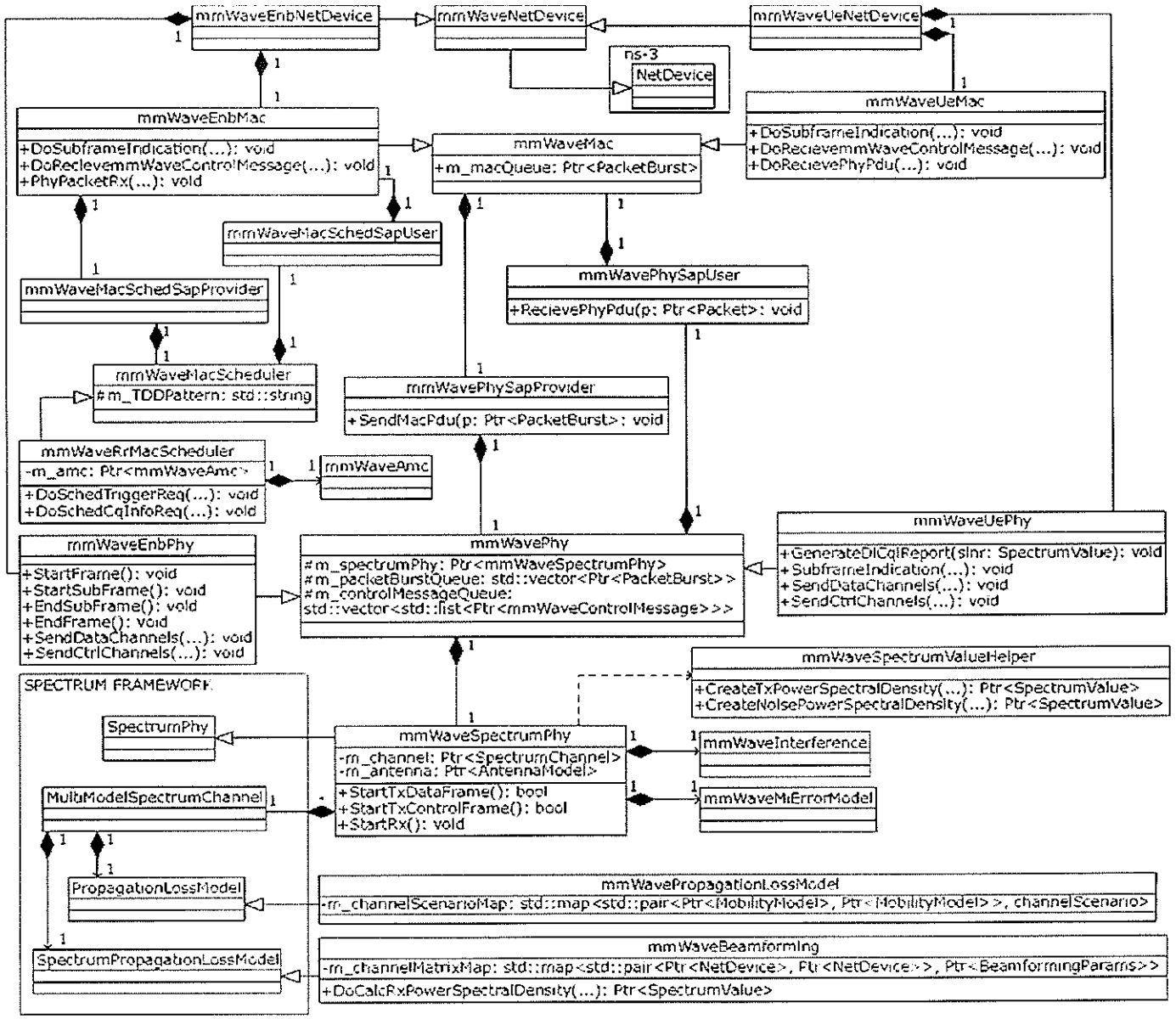
Створення моделі за допомогою інструментів управління AutoCAD



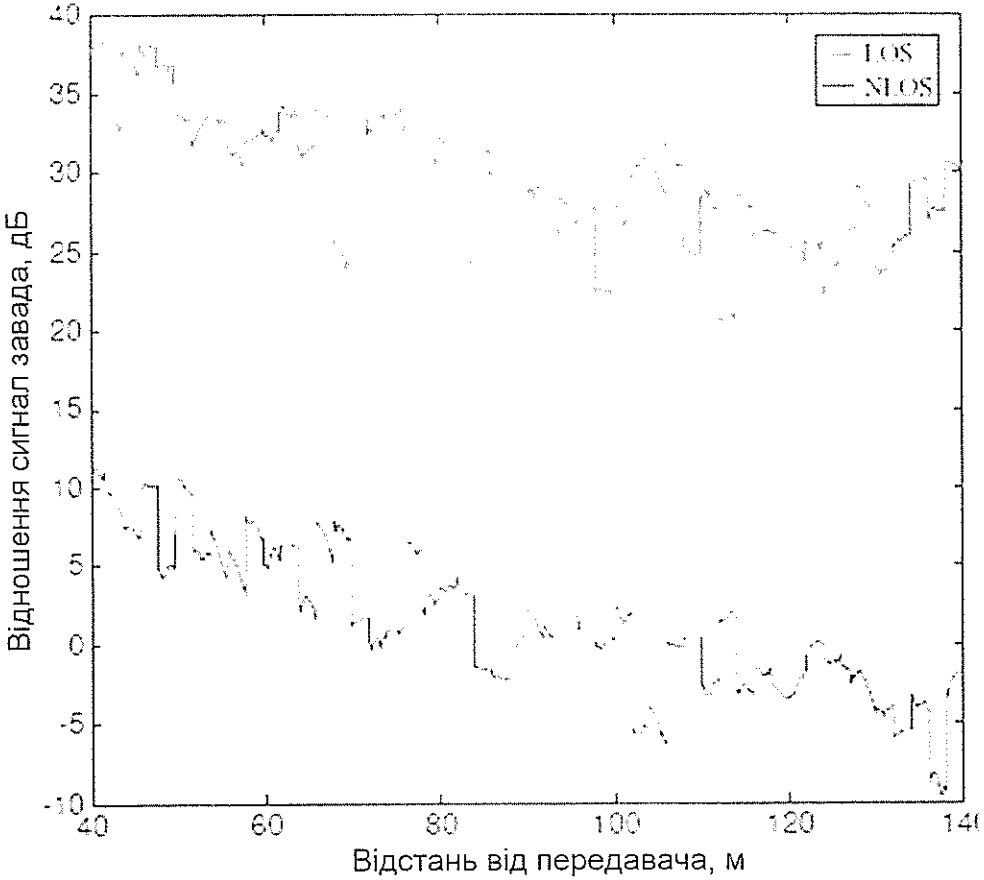
Вільне ПЗ NS-3 Simulator

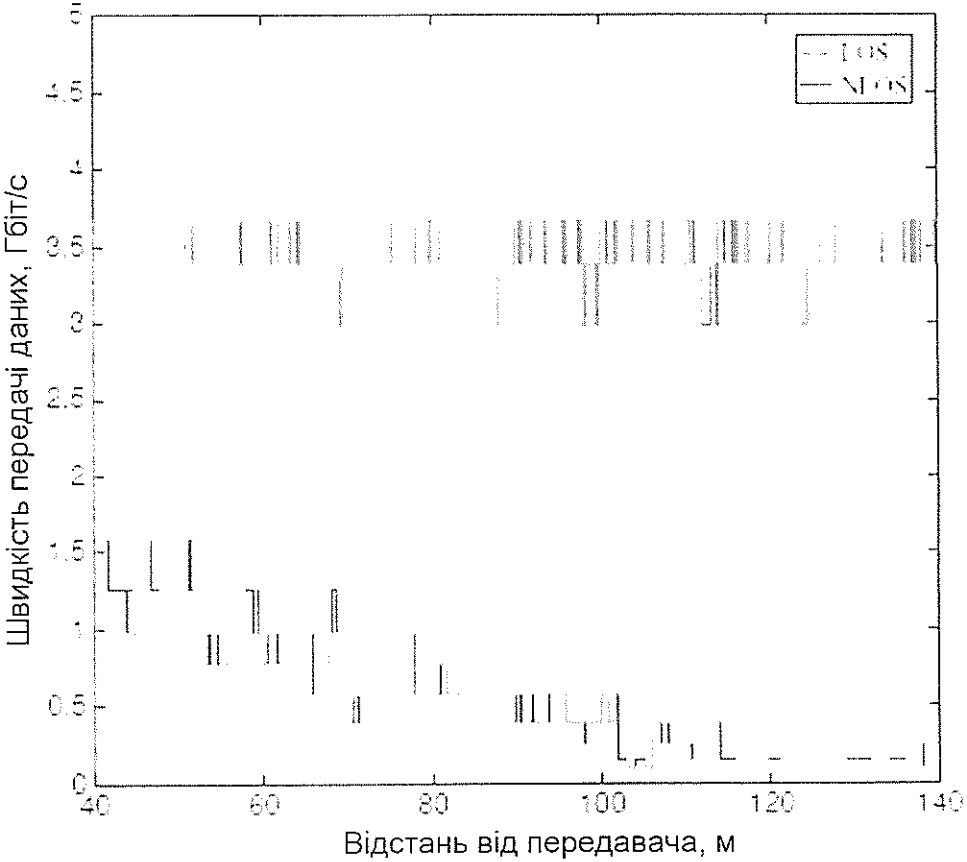


Модель розповсюдження радіохвиль WiFi в NS-3 Simulator на mobi UNL



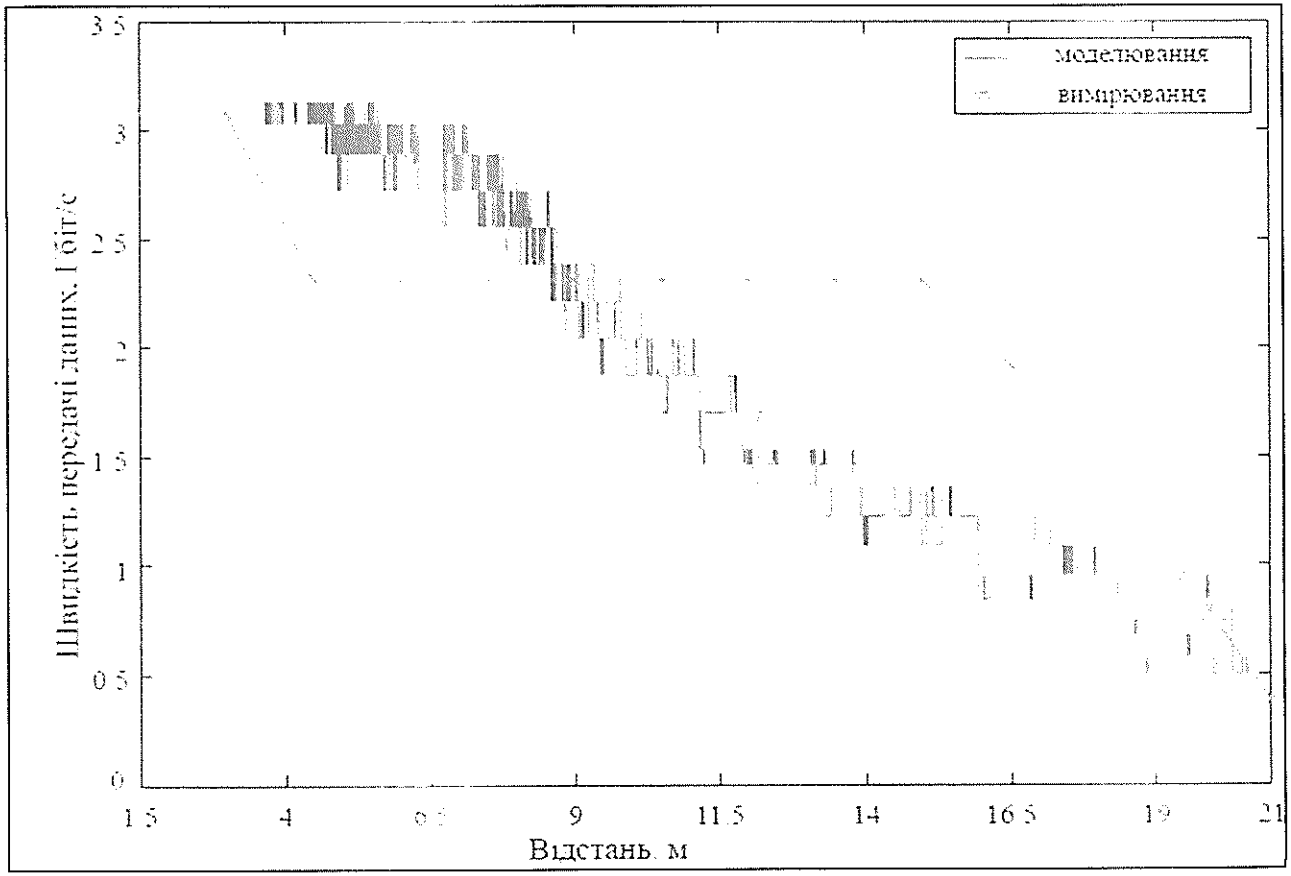
Моделювання характеристик розповсюдження радіохвиль в зовнішніх умовах





Моделювання характеристик розповсюдження радіохвиль в умовах закритої будівлі

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:

В роботі розглянуто питання моделювання розповсюдження сигналу безпроводових мереж всередині будинків.

У теоретичній частині досліджено принципи та методи поширення електромагнітних хвиль у зовнішньому середовищі та всередині будівель. Описано алгоритм та формули, що використовуються для імітації поширення сигналу WiFi 7 всередині приміщення офісного центру.

Друга половина роботи містить опис розробленої моделі, яка використовується для моделювання стандарту 802.11be (WiFi7), та результати моделювання отримані на симуляторі NS-3, їх аналіз та порівняння з результатами, отриманими в реальних вимірах.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУІКТ, 20 грудня 2023 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі “Наукові записки ДУІКТ, – 2023, – №2”.

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: Станіслав Сержанський

Назва: Розробка моделі розповсюдження радіохвиль безпроводової технології Wi-Fi 7

Координатор: Анатолій Макаренко

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:0.5

Коефіцієнт подібності 2:0

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*