

Міністерство освіти і науки України Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно комунікаційних систем  
(повна назва)

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський)

**ГЮІК. ХХХХХХ**

Дослідження роботи радіомосту міліметрового діапазону хвиль за межами приміщення

(тема)

Виконала студентка 2 курсу, групи РПСКм-20-1  
Асеева Софія Андріївна

(прізвище, ініціали) спеціальності

172 телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні пристрої

системи та комплекси (повна назва  
освітньої програми )

Керівник д.т.н. проф. Кафедри РТІКС

Руженев М.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпи

с) 2021

Цопа \_\_\_\_\_ О.І.

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування.

Керівник

Руженцев М.В.

Студент

Асєєва С.А.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра радіотехнологій інформаційно комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектронні пристрої системи та комплекси

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Асєєвій Софії Андріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження роботи радіомосту міліметрового діапазону хвиль за межами приміщення

затверджена наказом по університету від 05.11.2021р. № 1647Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 01 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз існуючих схемних рішень радіометрів для сантиметрового діапазону хвиль, запропонувати свої рішення

---

---

---

---

---

---

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1. Огляд літературних джерел за темою роботи;

2. Тенденції розвитку сучасних систем бездротового зв'язку

3. Компоненти моделювання мереж доступу 5g nr

---

---

---

---

---

---

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) комплект слайдів презентації

---



---



---



---



---



---



---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	д.т.н. проф. кафедри РТІКС Руженцев М.В.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел за темою роботи	05.11.2021	Виконано
2	Огляд схемних рішень радіометрів	15.11.2021	Виконано
3	Загальна характеристика мереж 5G	22.11.2021	Виконано
4	Моделі розповсюдження	30.11.2021	Виконано
5	Проведення експерименту та результати	30.11.2021	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки та слайдів презентації	01.12.2021	Виконано

Дата видачі завдання 4 вересня 2021 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ д.т.н. проф. Руженцев М. В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Робота містить: сторниць – 72, рисунків – 21, таблиць – 4, посилань на джерела – 24.

МІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН. АТМОСФЕРНЕ ПОГЛИНАННЯ, ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ, КУМУЛЯТИВНЕ РОЗПОДІЛЕННЯ

Об'єкт дослідження-Поширення радіохвиль ММ ДХ

.

Предмет дослідження - Дослідження і оцінка роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону

В атестаційній роботі проведені огляд та аналіз різних методів розрахунку готовності каналу зв'язку міліметрового діапазону та розповсюдження радіохвиль в атмосфері

Побудована кумулятивна функція ослаблення радіохвиль в атмосфері і проведено її аналіз

Розроблено апаратурно-методичне забезпечення та результати вимірювання чутливості радіометрів 3см та 8мм діапазонів хвиль

## **ABSTRACT**

The work contains: pages - 72, figures - 21, tables – 4, references to sources - 24

**MILLIMETER RANGE. ATMOSPHERIC ABSORPTION, COMMUNICATION  
LINE, CUMULATIVE DISTRIBUTION**

Object of research is the radio wave propagation.

Subject of research - Research and evaluation of the millimeter band communication channel

The evaluation work reviews and analyzes various methods of calculating the readiness of the millimeter band and the propagation of radio waves in the atmosphere.

The cumulative function of attenuation of radio waves in the atmosphere is constructed and its analysis is carried out.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
<b>1 СИСТЕМИ РАДІЗВ'ЯЗКУ І ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ</b> .....	<b>5</b>
1.1 Тенденції розвитку сучасних систем бездротового зв'язку .....	5
1.2 Особливості міліметрового діапазону довжин хвиль .....	8
1.2.1 Розповсюдження хвиль міліметрового діапазону в хвилеводних лініях передачі .....	11
1.3 Загальна характеристика мереж 5G .....	14
1.3.1 Базові послуги мереж 5G .....	18
1.3.2 Технічні особливості мереж 5G NR .....	20
1.4 Мережі доступу 5G NR у міліметровому діапазоні .....	22
1.4.1 Втрати розповсюдження .....	23
1.4.2 Вплив погодних умов .....	23
<b>2 КОМПОНЕНТИ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖ ДОСТУПУ 5G NR</b> .....	<b>26</b>
2.1 Моделі розповсюдження .....	26
2.2 . Моделі антен .....	29
<b>3 ВИКОРИСТАННЯ ПРЯМИХ З'ЄДНАНЬ МІЖ ПРИСТРОЯМИ ВКРАЙ ВИСОКИХ ЧАСТОТ</b> .....	<b>33</b>
3.1 Доцільність та варіанти використання прямих з'єднань .....	33
3.1.1 Обґрунтування та застосування зв'язку «пристрій – пристрій».....	33
3.1.2 Альтернативні радіотехнології для з'єднань D2D .....	34
3.1.2 Виявлення сусідів та встановлення з'єднання D2D .....	38
3.2 Використання прямих з'єднань на не ліцензованих частотах .....	33
3.2.1 Вивчення зв'язку D2D у неліцензованому спектрі .....	42
3.2.2 Підхід до аналізу систем D2D .....	44
<b>4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ</b> .....	<b>52</b>
4.1 Опис експерименту та представлення результатів.....	52
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>56</b>

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....57

ДОДАТОК А

ДОДАТОК Б

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ММ – МІЛІМЕТРОВИЙ

ДХ – Діапазон хвиль

ITU – International Telecommunication Union

КВП – коефіцієнтом використання поверхні

ДНА – діаграма направленості антени

ДН – діаграма направленности

## ВСТУП

Розвиток технологій в області мобільних мереж, інтернету і росту користувачів потребує більш високої швидкості передачі даних. Тому в області технології передачі даних почали використовувати більш високі частоти, аж до 100ГГц. Використання високочастотних технологій дозволяє забезпечити зростання обсягів клієнтів інтернету та швидкості передачі інформації вище 10 Гбіт / сек, але для цього потрібно розрахувати готовність каналу зв'язку міліметрового діапазону хвиль. Вимоги до введення в експлуатацію п'ятого покоління зв'язку це, коефіцієнт готовності 0.01-0.001%. Для частоти вище 10 ГГц для виконання цих вимог важливо знати кількість випадання річних опадів, так як поглинання і розсіяння радіохвиль міліметрового діапазону (ММ ДВ) в дощі і в деяких типах хмар дуже високе, що не допустимо при побудові стабільного радіомосту. [1].

Актуальність питання вивчення ослаблення радіохвиль ММ діапазону дуже виросла в прогресивних країнах за останні декілька років, це пов'язано з розробками перспективних технологій для яких потрібна дуже велика швидкість та передавання по мережі великого об'єму даних, а для цього потрібно вводити мережу п'ятого покоління (5G) і наступних поколінь.

Ціль да задача кваліфікаційної роботи: дослідити розповсюдження радіохвиль ММ діапазону, провести експеримент на частоті 60 ГГц.

# 1. СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ І ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Цей розділ присвячений розгляду особливостей сучасних систем зв'язку, призначених для високошвидкісної передачі даних, а також переваг та обмежень, які відкриваються під час переходу в міліметровий діапазон довжин хвиль. Розуміння особливостей функціонування таких систем зв'язку дозволяє сформулювати основні вимоги до таких систем загалом та до їх окремих складових, таким як переходи між хвилеводом та планарними лініями передачі. Хоча повний набір вимог до аналізованих переходів може бути точно визначено лише на підставі закінченої специфікації системи радіозв'язку, деякі основні вимоги будуть загальними, обумовленими виключно функціональними особливостями систем зв'язку міліметрового діапазону довжин хвиль та призначенням використовуваних переходів між металевим хвилеводом та планарною лінією передачі. Також у цьому розділі проведено огляд різних відомих конструкцій переходів, обговорюються їх переваги та недоліки.

## 1.1. Тенденції розвитку сучасних систем бездротового зв'язку

В даний час системи бездротового зв'язку набули широкого поширення майже у всіх сферах життя людини. Зокрема, якщо ще 10-15 років тому стільникові мережі використовувалися в основному для голосового зв'язку та передачі коротких текстових повідомлень, зараз це найпоширеніший спосіб доступу до інтернету, а також передачі інформації та мультимедіа. Так, згідно з деякими оцінками, протягом останніх десятиліть обсяг мобільного трафіку для кінцевого користувача збільшується приблизно на 50% щороку [2]. І ця тенденція зберігатиметься у найближчому майбутньому.

Зростання обсягу переданої інформації супроводжується також зростанням числа користувачів і числа пристроїв, що підключаються до стільникових і

локальних мереж, які в даний час крім мобільних телефонів також включають персональні комп'ютери, електроніку, побутову техніку і різні системи контролю та управління. Закономірним етапом розвитку цієї технології є концепція інтернету речей. of-Things (IoT)) [3], [4], мережі фізичних предметів, оснащених технологічними можливостями для взаємодії один з одним та зовнішнім середовищем. При цьому кожен елемент такої мережі інтернету речей повинен мати можливість підключення до глобальної мережі безпосередньо чи через інші елементи мережі.

Обмін великими обсягами інформації передбачає суттєве збільшення пропускної спроможності як кінцевих пристроїв, так і вузлових базових станцій, навантаження на які суттєво зростає зі збільшенням кількості з'єднань. Це призводить до необхідності зменшення площі покриття кожної окремої базової станції з метою збереження пропускної спроможності кожного користувача. Наслідком цього є дроблення великих сот, що покривають радіус від одиниць кілометрів в умовах міської забудови до понад 10 кілометрів на відкритих ділянках, на дрібніші складові («малі стільники», small cells) [5], з малопотужними та мініатюрними базовими станціями для забезпечення необхідної пропускної спроможності для всіх кінцевих користувачів. Малі стільники можуть бути розділені по зоні покриття на метростіни, мікростільники, пікосоти та фемтосоти. Останні при цьому мають зону покриття до однієї квартири, або офісу. Завдяки використанню технології малих стільників, покриття та ємність мережі різко покращується саме в тих точках, де це необхідно: усередині будівель чи місцях великого скупчення людей, як, наприклад, громадський транспорт чи масові заходи.

Важливим завданням за такої структури стає організація транспортної мережі забезпечення передачі даних між базовими станціями малих стільник, локальними користувальницькими мережами та вузловими базовими станціями. Очевидно, що пропускна здатність такої мережі повинна підтримувати одночасну роботу з усіма малими базовими станціями і, отже, мати можливість передачі значних обсягів даних. Традиційно для цих програм використовують лінії передачі на основі оптоволоконних кабелів, проте їх розміщення є надзвичайно дорогим, як умовах

щільної міської забудови через складність проведення робіт з прокладання, так і на відкритій місцевості через загальну довжину ліній. У цьому випадку забезпечення передачі даних між базовими станціями по радіочастотному каналу є перспективною і економічно ефективною альтернативою. Крім того, передача даних між базовими станціями по радіочастотному каналу може бути організована як резервна лінія на випадок відмови чи пошкодження оптичної лінії передачі. Схематичне уявлення взаємодії пристроїв та мереж сучасних бездротових систем зв'язку [6] представлено на рисунку 1.1.

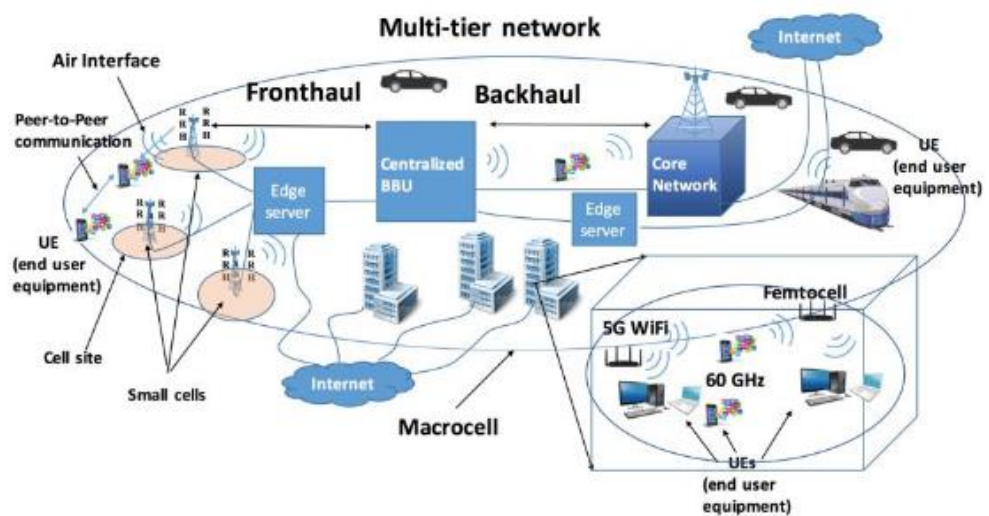


Рисунок. 1.1 - Внутрішньомережева та міжмережева взаємодія пристроїв у сучасних бездротових мережах

Завдання підвищення пропускної спроможності в описаних системах бездротового зв'язку можна вирішити, в першу чергу, за рахунок використання ширшої смуги частот, що представляється вкрай скрутним в умовах перевантаженого спектру в традиційних частотних діапазонах до 6 ГГц. Додатковим ускладненням є необхідність використання складних технологій частотного планування для зменшення взаємного впливу великої кількості пристроїв, що працюють на близьких частотах. Основним підходом до розширення робочої смуги частот передаваних сигналів в даний час є збільшення несучої частоти до міліметрового діапазону довжин хвиль (30-300 ГГц).

## 1.2. Особливості міліметрового діапазону довжин хвиль

Міліметровий діапазон довжин хвиль дозволяє використовувати для передачі сигналу ряд частотних смуг шириною до декількох гігагерц, що значно перевищує доступні в традиційних радіочастотних областях спектру до 6 ГГц смуги і видається достатнім для досягнення швидкостей передачі даних до одиниць і навіть десятків Гбіт/сек. В зокрема, що найбільш активно застосовуються для розробки нових систем фіксованої радіозв'язку міліметрових (або близьких до них) діапазонів є діапазони 24,25 – 26,5 ГГц , 27,5 – 29,5 ГГц , 40,5 – 43,5 ГГц, 57 – 66 ГГц , 71 – 76/81 – 86 ГГц та 92 - 95 ГГц, показані на частотній шкалі на рисунку 1.2.

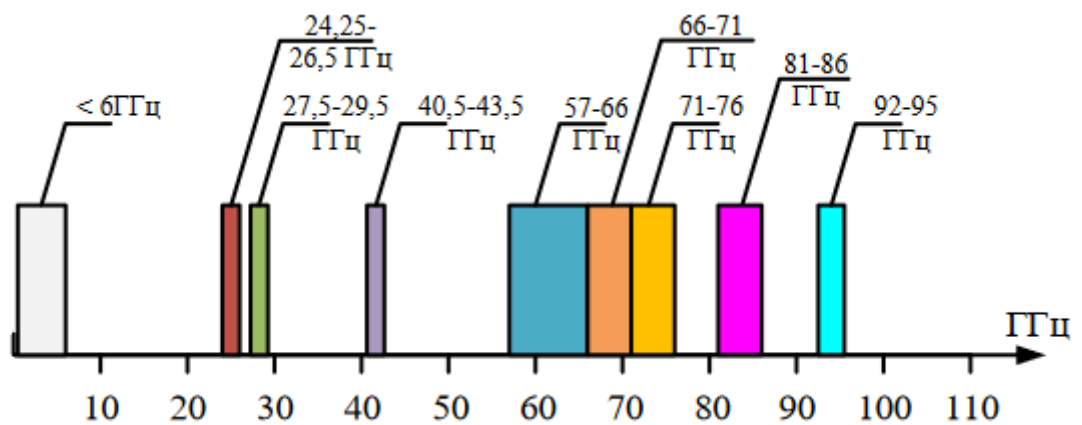


Рисунок. 1.2 - Найбільш поширені міліметрові діапазони

Проте, крім очевидних переваг, міліметровий діапазон має ряд особливостей, що накладають певні вимоги на системи зв'язку цього діапазону та їх окремі елементи.

Однією із складнощів при розробці систем радіозв'язку міліметрового діапазону довжин хвиль є забезпечення високих значень КУ використовуваних системами зв'язку антен для компенсації значного рівня згасання радіосигналу в каналі зв'язку в порівнянні з діапазонами частот нижче 6 ГГц [7]. Для розрахунку дальності радіоз'єднання зазвичай використовують формулу Фрііса.

Зрозуміло, що при поширенні сигналу міліметрового діапазону у вільному просторі рівень прийнятої потужності буде значно меншим у порівнянні з сигналами діапазонів частот, що використовуються сьогодні (при однакових відстанях і коефіцієнтах посилення антен) з огляду на більшу електричну довжину з'єднання. Так, наприклад, на частоті 60 ГГц рівень прийнятої потужності на 28 дБ і 21,5 дБ менше, ніж для широко використовуваних сьогодні діапазонів 2,4 та 5 ГГц відповідно. Тому, системи зв'язку міліметрового діапазону повинні використовувати антени з високим КУ і, отже, вузьким головним променем ДН, навіть під час роботи на невеликі відстані.

Також однією з основних причин ослаблення радіохвиль міліметрового діапазону на каналі є вплив кисню та водяної пари [8], як показано на Рисунку 1.3.

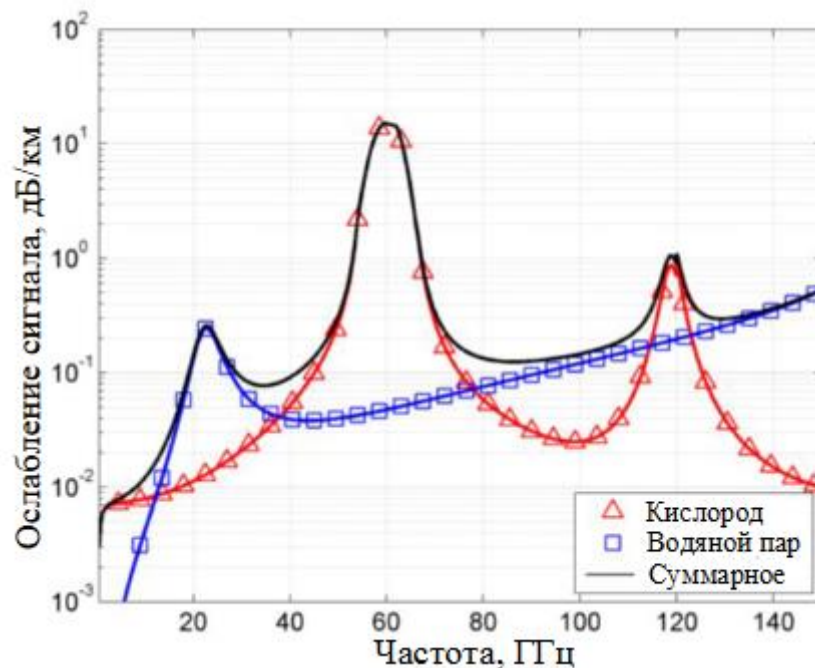


Рисунок 1.3 - Величина ослаблення радіосигналу в каналі зв'язку, спричиненого впливом кисню та водяної пари

Крім того, значний вплив на рівень загасання надають опади, як було показано в [9] та [10], а також роз'яснено у рекомендаціях Міжнародного Союзу Електрозв'язку (ITU). Величина рівня ослаблення радіосигналу в залежності від Інтенсивність опадів представлена на рис. 1.4.

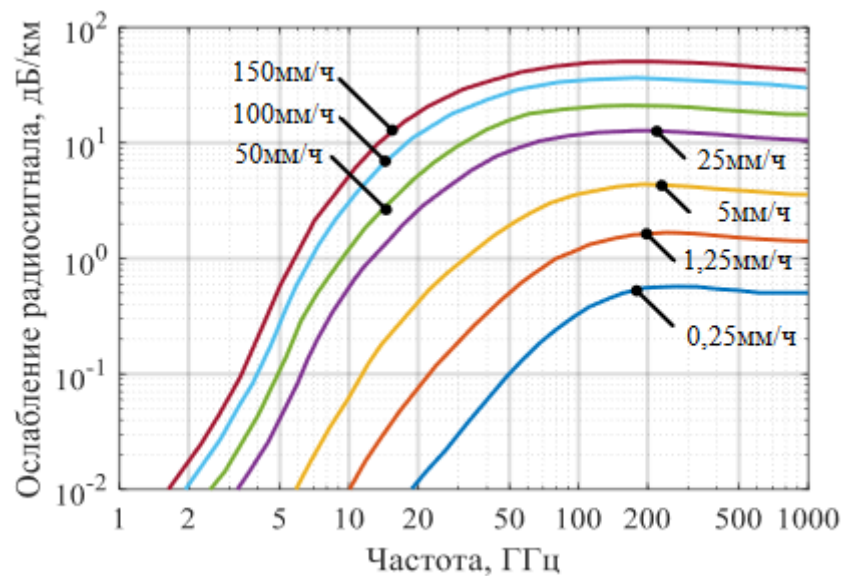


Рисунок 1.4 - Ослаблення радіосигналу за різної інтенсивності опадів

При інтенсивності опадів, відповідних дощу (25 мм/ч), загальний рівень ослаблення радіосигналу зі збільшенням робочої частоти з 6 ГГц до 30 ГГц зростає з 0,05 дБ/км до 6 дБ/км, що значно впливає на характеристики радіоз'єднання. При цьому інтенсивність дощу є статистичним параметром деякою щільністю ймовірності, специфічної кожної географічної області. Зазвичай як критерій оцінки системи зв'язку вибирається доступність каналу, визначає середній час, для якого забезпечується повна заявлена пропускна здатність. Найчастіше використовуваними у сучасних системах зв'язку є критерії доступності 99,9%, 99,99% та 99,999%, що відповідають відсутності зв'язку в обраному каналі приблизно 52 хвилини, 5 хвилин та 30 секунд на рік.

У зв'язку з цим основні регуляторні документи, прийняті в Російській Федерації, США та країнах Європи, регламентують для використання у міліметровому діапазоні частот тільки гостронаправлені антени для систем зв'язку типу «крапка-крапка» або комбінацію з гостронаправленої антени абонентської станції та секторної антени з одним променем для базової станції у разі системи «точка-багатоточка». Слід зазначити, що здебільшого випадків такі антени мають хвилеводний інтерфейс, що потребує застосування переходів між металевим

хвилеводом та планарною лінією передачі для підключення до елементів радіочастотного тракту системи зв'язку.

Не менш важливим аспектом розробки систем радіозв'язку міліметрового діапазону Довжина хвиль є значне збільшення втрат в лініях передачі зі зростанням частоти. Крім того, починають впливати властивості матеріалів і технологічні особливості їхнього виробництва. Докладніше розглянемо поширення хвиль міліметрового діапазону в хвилеводних та планарних лініях передачі, що утворюють аналізовані цієї дисертації переходи.

### 1.2.1 Розповсюдження хвиль міліметрового діапазону в хвилеводних лініях передачі

Порожні металеві хвилеводи знаходять широке застосування у випадках, коли необхідно забезпечити малі втрати поширення сигналу або передачу сигналів великої потужності на високих частотах. Через обмеження за розміром та масою жорсткі хвилеводи зазвичай застосовуються на частотах від 1 ГГц. до одиниць ТГц. Зазвичай прямокутні хвилеводи використовуються для передачі сигналів з лінійною поляризацією, а хвилеводи з круглим або квадратним перетином – з круговою або двома ортогональними лінійними поляризаціями.

Основною модою сигналу, що розповсюджується у прямокутному хвилеводі, є мода TE<sub>10</sub>, яка не має складової електричного поля за напрямком розповсюдження сигналу. Проектування хвилеводних пристроїв для роботи саме на основний нижчій моді пояснюється тим, що це забезпечує максимальний діапазон робітників частот в одномодовому режимі (коли поширюється лише одна мода), крім того, такий хвилевід має мінімальні розміри поперечного перерізу в діапазоні, що розглядається. частот, а також забезпечує найменше згасання під час поширення.

Таким чином, всі хвилеводи можуть бути класифіковані за розміром, який повністю визначає їхню частотну смугу пропускання. Одна з основних класифікацій прямокутних хвилеводів надано Міжнародною Електротехнічною Комісією (International Electrotechnical Commission) у відповідному стандарті. Так, наприклад, відповідно до даною класифікацією, для роботи в найпоширеніших міліметрових

діапазонах можуть використовуватися хвилеводи з характеристиками, наведеними в Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Характеристики різних прямокутних хвилеводів, призначених для роботи у найбільш поширених міліметрових діапазонах

Обозначение	$f_{с10}$ , ГГц	Сечение $a \times b$ , мм	Рабочий диапазон частот, ГГц
WR34	17,36	8,64 × 4,32	21,7 – 33,0
WR28	21,08	7,12 × 3,56	26,4 – 40,1
WR22	26,35	5,69 × 2,85	33,0 – 50,1
WR15	39,88	3,76 × 1,88	49,9 – 75,8
WR12	48,38	3,1 × 1,55	60,5 – 92,0
WR10	59,02	2,54 × 1,27	73,8 – 112

Незважаючи на те, що хвилеводні лінії передачі мають виняткові електродинамічні властивості, що дозволяють здійснювати передачу сигналу міліметрового діапазону довжин хвиль з мінімальними втратами, деякі технологічні особливості виробництва хвилеводних компонентів, а також властивості матеріалів та експлуатаційні обмеження можуть суттєво погіршити характеристики хвилеводних пристроїв.

Втрати у металевому хвилеводі при поширенні електромагнітної енергії визначаються втратами в діелектриці, що заповнює структуру хвилеводу і втратами провідних стінок. Для найпоширеніших хвилеводів із повітряним заповненням втрати в діелектриці є незначно малими і можуть бути виключені з розгляду. Втрати у провідних стінках зумовлені насамперед кінцевою провідністю матеріалу хвилеводу. При проходженні електричного струму через провідник частина електричної енергії переходить у теплову, що додатково значно посилюється за рахунок явища скін-ефекту – зменшення амплітуди електромагнітних хвиль у міру їх проникнення вглиб провідного середовища.

Зі зростанням частоти товщина скін-шару зменшується, що призводить до збільшення щільності струму в приповерхневому шарі провідника, а отже, до значного зростання активного опору провідника та збільшення погонних втрат.

Розраховані погонні втрати у хвилеводах різного перерізу, зазначених у Таблиці 1.1, наведені на малюнку 1.5. Суцільними лініями показані значення для провідності матеріалу стінок хвилеводу, що відповідає міді, крапками – для срібла, найчастіше використовуваного для додаткового покриття стінок хвилеводних компонентів, а штрихами – для чистого алюмінію.

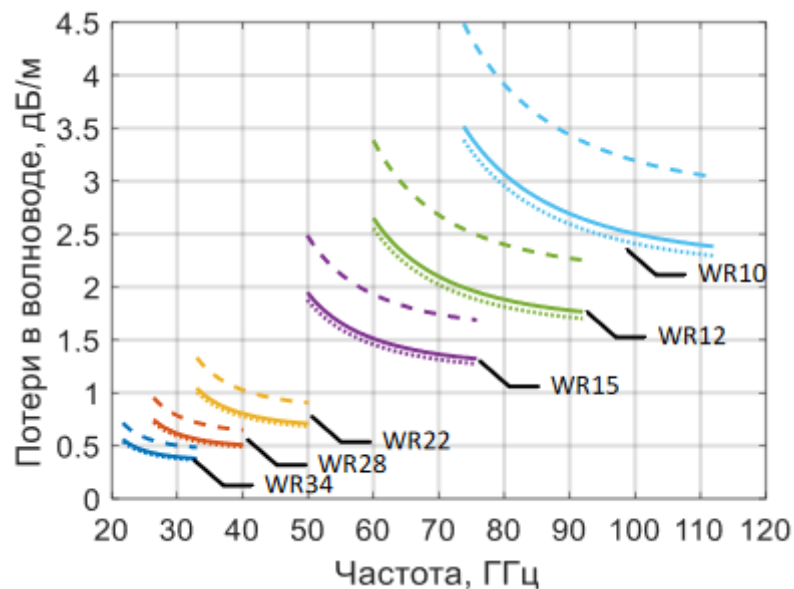


Рисунок 1.5 - Погонні втрати у хвилеводах різного перерізу з повітряним заповненням для одномодового режиму (суцільна лінія – мідь, крапки – срібло, штрихова лінія –алюміній)

Як видно з представлених на Малюнку 1.5 результатів, втрати у структурі хвилеводу значно збільшуються зі зростанням частоти та зменшенням розмірів поперечного перерізу прямокутного хвилеводу. Це пов'язано, насамперед, зі збільшенням електричної довжини та зростанням щільності поверхневого струму на стінках хвилеводу. Варто зазначити, що якщо для аналізованого діапазону частот хвилеводного пристрою, що розробляється, робота в одномодовому режимі можлива

на хвилеводах різного перерізу, то найменші втрати забезпечуватиме хвилевід більшого розміру. При цьому вибір матеріалу провідника та, відповідно, його провідність має визначальне значення для конкретної робочої частоти.

### 1.3. Загальна характеристика мереж 5G

Завданням мереж зв'язку п'ятого покоління (Fifth Generation, 5G) є задоволення зростаючих потреб у мобільному зв'язку держав, підприємств, і навіть окремих громадян. Передбачається, що мережі 5G відіграватимуть ключову роль у перетворенні міст у розумні міста, що дозволить громадянам та суспільству загалом, отримати соціально-економічні вигоди, що їх дає передова цифрова економіка з інтенсивним використанням даних [11].

Концепція побудови мереж зв'язку 5G обіцяє підвищити якість обслуговування кінцевих користувачів, пропонуючи нові програми та послуги з гігабітною швидкістю передачі даних, а також значно підвищуючи продуктивність та надійність ССОП загалом. Мережі 5G спиратимуться на успіхи мобільних мереж попередніх поколінь, що змінили суспільство, надавши нові послуги та бізнес-моделі. Зокрема мережі 5G будуть дозволяти операторам бездротового зв'язку не лише надавати послуги зв'язку, а також розробляти власні нові рішення та послуги для споживачів та промисловості у різних секторах.

Очікується, що комерційні мережі 5G почнуть розгортатися після 2020 року, коли буде завершено роботу зі стандартизації таких систем. До 2025 року Асоціація GSM (GSMA) очікує, що одноразова кількість підключень до мереж 5G сягне 1,1 мільярда, що буде складати близько 12 відсотків від загальної кількості підключень. Також прогнозується, що загальні доходи операторів зростуть у середньому на 2,5 відсотка, досягнувши 1,3 трильйона доларів США до 2025.

З технічного боку очікується, що мережі 5G значно збільшать швидкість передачі даних та зменшать затримку порівняно із мережами попередніх поколінь. Зокрема, мережі 5G покликані забезпечити затримку менше 1 мс на бездротовій ділянці доступу, що є необхідною умовою для критично важливих служб, де дані є

чутливими до часу доставки. Висока швидкість доступу на абонентській ділянці, що сумарно досягає 10 Гбіт/с, дозволить мережам зв'язку 5G надавати широкий спектр високошвидкісних широкосмугових послуг та запропонує альтернативний підхід для доступу на “останній милі”.

Мережі зв'язку 5G підтримуватимуть різні швидкості передачі даних, що надаються користувачам, що охоплюють різні сценарії використання [12]. Відповідно до вимог до систем 5G, визначених у Рекомендації МСЕ-Р М.2083, див. 1.6, сумарна пікова швидкість передачі даних 5G, як очікується, повинна досягати 10 Гбіт/с. Проте, за певних умов та сценаріїв повинна підтримувати пікову швидкість передачі даних до 20 Гбіт/с. Для випадків розгортання на великих площах, наприклад, у міських та приміських районах очікується, що швидкість передачі даних для користувача має становити 100 Мбіт/с. У зонах з екстремальними вимогами швидкість передачі на одного користувача, має досягати більш високих значень, наприклад, до 1 Гбіт/с усередині приміщень.

Очікується, що ефективність використання спектра в мережах зв'язку 5G буде вдвічі-втричі вищою порівняно з 4G. Також передбачається, що мережі 5G будуть надавати просторову ємність, що досягає 10 Мбіт/с/м<sup>2</sup> в областях з високими вимогами, наприклад, майдани, торгові центри. Споживання енергії для мережі радіодоступу 5G не повинно бути вищим, ніж у розгорнутих сьогодні мереж 4G. Отже, на етапі розробки ефективність енергоспоживання як базових станцій (БС), так і абонентських пристроїв (АУ) має бути підвищена, принаймні, такою ж мірою, як і передбачуване збільшення пропускної спроможності 5G проти 4G.



Рисунок 1.6 — Вимоги до мереж зв'язку 5G.

Крім зазначених вимог мережі 5G у спеціальному режимі повинні забезпечити затримку на бездротовому інтерфейсі не більше ніж 1 мс, забезпечуючи підтримку послуг із украй високими вимогами до затримки. Також, мережі 5G повинні забезпечити підтримку абонентів з високою мобільністю, швидкість яких досягає 500 км/год, зберігаючи при цьому потрібні параметри якості обслуговування. Такі послуги передбачені, зокрема, для швидкісних поїздів. Нарешті, мережі 5G, повинні будуть підтримувати щільність абонентів до 10 шостою на км квадратний, наприклад, у надщільних сценаріях міжмашинної взаємодії.

Розробкою стандартів мереж зв'язку 5G займаються кілька міжнародних організацій. Серед них присутні як офіційні організації, які займаються підготовкою специфікацій системи загалом, так та спеціалізовані галузеві альянси з вузькою спеціалізацією в тій чи іншій області.

Партнерський проект третього покоління (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) відповідальний за визначення та підтримку стандартів поточного та

наступного покоління технологій мобільного зв'язку. Робота з Розробка стандартів у 3GPP організована в наступних групах: (i) мережі радіодоступу, (ii) аспекти обслуговування абонентів, (iii) транспортна мережу та АУ. Кожна з цих груп також включає кілька робочих груп. 3GPP використовує поетапний підхід для визначення стандартів визначивши три стадії, послідовно орієнтовані визначення спектр послуг, архітектура мережі і, нарешті, докладні специфікації інтерфейсів системи.

Європейський інститут стандартизації електрозв'язку (European Telecommunications Standardization Institute, ETSI) проводить заходи по стандартизації, в яких визначаються вимоги, функціональні можливості та будівельні блоки для всієї системи 5G. Ряд технічних комітети активно співпрацюють з 3GPP і, в деяких випадках, вирішують Завдання, визначені 3GPP.

МСЕ координує розробку глобальних стандартів електрозв'язку на додаток до стимулювання зростання та сталого розвитку сектора та забезпечення загального доступу до поточних специфікацій системи. Діяльність МСЕ зосереджена на трьох основних секторах, а саме: (i) телекомунікаційний сектор (МСЕ-Т) визначає глобальні стандарти електрозв'язку; (ii) сектор радіозв'язку (МСЕ-Р) керує міжнародними ресурсами радіочастотного спектру; (iii) сектор розвитку (МСЕ-Д) підтримує місію МСЕ із забезпечення інтеграції з РСОП. У межах МСЕ міжнародні стандарти рухомого зв'язку 2020 (ІМТ-2020) визначають сукупність систем, компонентів та пов'язаних з ними елементів. тов, які підтримують розширені можливості, крім тих, що вже пропонуються системами ІМТ-2000 (3G) та ІМТ-Advanced (4G). ІМТ-2020 має такі цілі: (i) координація процесу дослідження мереж 5G; (ii) визначення структури та загальних цілей процесу стандартизації 5G; (ii) розробка плану, відповідно до якого, процес стандартизації має завершитися до 2020 року.

На процес стандартизації мереж зв'язку 5G впливають галузеві альянси, які представляють інтереси певних галузевих груп, і навіть великі міжнародні проекти. До таких альянсів варто віднести 5G PPP, DVB, ONF, MultiFire, MEF, NGMN, METIS.

### 1.3.1 Базові послуги мереж 5G

Оператори ССОП, виробники обладнання спільно з організаціями стандартизації мереж 5G зв'язку визначили кілька потенційних варіантів використання таких мереж. На основі проведеного аналізу запропоновано підтримку трьох принципово різних категорій послуг:

- розширена послуга широкопasmового доступу (Enhanced Mobile Broadband, eMBB);
- послуга ультранадійного зв'язку з низькою затримкою (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC);
- послуга надщільної міжмашинної взаємодії (Massive Machine-Type Communications, mMTC).

Послуга eMBB спрямована на задоволення потреб користувачів надвисокої швидкості на абонентській ділянці доступу. До програм, що вимагають таких швидкостей, можна віднести перегляд відео високої роздільної здатності, окуляри та шоломи доповненої та віртуальної реальності, передача великих обсягів даних. Очікується, що eMBB буде основним варіантом використання 5G у його ранніх розгортання [13]. eMBB також дозволить споживачам використовувати високошвидкісні потокові послуги для домашніх, екранних та мобільних пристроїв на вимогу та забезпечить подальший розвиток корпоративних послуг. Деякі оператори розглядають eMBB як рішення "останньої милі" у тих районах, де відсутні оптичні мережі доступу.

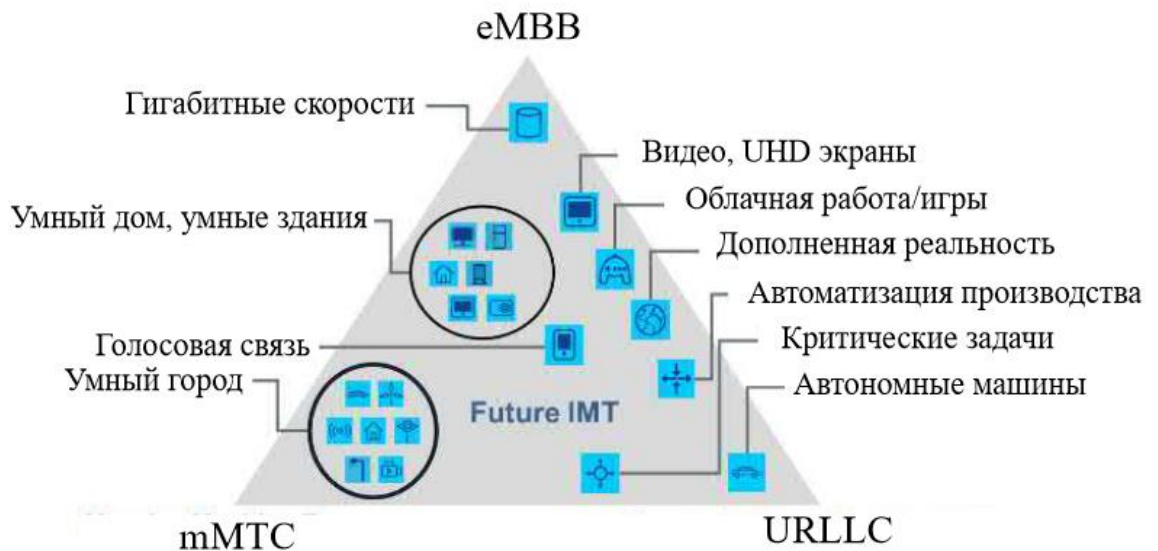


Рисунок 1.7 - Заплановані послуги мереж зв'язку 5G

Низькі показники затримки та високий рівень безпеки у мережах зв'язку 5G будуть відігравати важливу роль у розвитку інтелектуальних транспортних систем майбутнього, дозволяючи транспортним засобам зв'язуватися один з одним і створюючи нові можливості для впровадження автономних легкових та вантажних автомобілів. Наприклад, автономний транспортний засіб, керований через хмарну систему керування, має бути здатним негайно зупинитися, прискорюватися або повертати, відповідно до одержуваних інструкцій [14]. Будь-яка затримка передачі інформація в мережі або втрата сигналу від базової станції, що перешкоджає доставці повідомлення, може призвести до катастрофічних наслідків. Низька затримка робить мережі 5G також придатними для віддаленої хірургії, автоматизації виробництва та контролю процесів у реальному часу.

Очікується, що мережі зв'язку 5G також сприятимуть розвитку розумних міст та Інтернету Речів (Internet of Things, IoT) шляхом розгортання сенсорних мереж у містах та сільській місцевості. Безпека та надійність, вбудовані в 5G, зроблять такі мережі придатними для забезпечення громадської безпеки, а також для використання в критично важливих службах, таких як поліція та служби безпеки, енергетика, водопостачання та охорона здоров'я.

Спектр послуг, що надається мережами 5G, не обмежується eMBB, URLLC та mMTC. Ці послуги визначають типові програми з полярними вимогами до характеристик обслуговування. Спектр послуг, які будуть підтримуватися в мережах 5G зв'язку зручно зображати у вигляді трикутника, як показано на Мал. 1.2. Тут грані трикутника визначають фіксовані вимоги до швидкості доступу, надійності передачі та затримці. Як усередині трикутника, так і на його гранях розташовуються програми, які мають ті чи інші набори вимог.

### 1.3.2 Технічні особливості мереж 5G NR

Набір технологій конвергенції провідних та бездротових мереж (Fixed Mobile Convergence, FMC) – мережне рішення, яке дозволяє у будь-який момент часу надавати послуги кінцевому користувачеві незалежно від технологій провідного або мобільного доступу та розташування користувача. Концепція FMC реалізується в ССОП з 2005 року. З переходом до систем зв'язку 5G FMC набуває додаткової привабливості. У Рекомендації МСЕ-Т Y.3101 мережа 5G передбачає незалежну від мережі доступу архітектуру, ядром якої буде загальна уніфікована транспортна мережа для нових технологій радіодоступу IMT-2020, а також для фіксованих та бездротових мереж, наприклад, бездротових локальних мереж (Wireless Local Area Network, WLAN). Очікується, що уніфікована транспортна мережа, яка не залежить від технології доступу, доповнюватиметься загальними механізмами управління, відокремленими від технологій доступу.

Нові інформаційні та комунікаційні технології, наприклад, програмно-визначені мережі (Software-Defined Network, SDN), віртуалізація мережевих функцій (Network Function Virtualization, NFV) перетворюють провідні та мобільні мережі операторів зв'язку для досягнення високого рівня використання ресурсів та гнучкості мережі, що, у свою чергу, сприяє конвергенції функцій у мережах зв'язку 5G. З цією метою МСЕ-Т затвердила Рекомендацію МСЕ-Т Y.3130, в якій зазначено пов'язані з послугами вимоги, такі як уніфікована ідентифікація та тарифікація користувача, безперервність та гарантована якість обслуговування.

Більшість розгортань мобільних мереж доступу 4G в даний час засновані на концепції макростіт. Використання макростіт дозволяє охоплювати великі території,

але призводить до проблем з нарощування ємності мережі. Для реалізації мереж із щільним покриттям, високою пропускну здатністю та низькою затримкою, оператори бездротового зв'язку вкладають кошти в ущільнення своєї мережі радіо доступу 4G (особливо, у густонаселених міських районах) шляхом розгортання мікросот. Такі стільники, обслуговуючи набагато меншу географічну область, дозволяють збільшувати пропускну здатність мережі і, як наслідок, підвищувати якість обслуговування.

Розгортання мікростільників є одним із способів підвищення ємності існуючих мереж 4G, одночасно закладаючи основу для комерційних мереж 5G та послуг eMBB. Мікростільники дозволяють збільшувати пропускну здатність мережі без необхідності додаткового спектру частот, що робить їх привабливими для операторів. Оператори зв'язку дотримуються думки, що початкове розгортання мереж 5G відбуватиметься у густонаселених міських районах основі мікросот. Навпаки, комерційно складно розгортати мережі 5G у сільських районах, де попит на послуги зв'язку, як правило, нижчий. Однак використання частотного спектра нижче 1 ГГц, якщо він доступний, може дозволити вирішити завдання покриття таких районів. Ця частина спектру дозволить операторам мобільного зв'язку покривати великі площі меншими витратами.

Гнучкість та адаптивність є одними з визначальних особливостей мереж зв'язку 5G. Ці характеристики будуть значною мірою обумовлені реалізацією ядра мережі, у якому апаратні засоби транспортної мережі та функції управління будуть розділені. Такий поділ забезпечить необхідну гнучкість впровадження послуг у мережах зв'язку 5G та буде засноване на чотирьох основних функціональних можливостях:

- Функції NFV замінять та уніфікують функції на мережевих пристрої, такі як маршрутизатори, балансувальники навантаження та брандмауери, віртуальні екземпляри, що знизить вартість змін та оновлень мережі [64–66];
- Функції SDN забезпечать динамічну реконфігурацію мережевих елементів у режимі реального часу, дозволяючи керувати мережами 5G програмним, а не

апаратним забезпеченням, підвищуючи стійкість мереж, продуктивність та якість обслуговування;

– Функції динамічного поділу спектра дозволять розділити фізичну мережу на кілька віртуальних мереж (логічних сегментів), які можуть підтримувати різні технології радіодоступу або кілька типів послуг для певних клієнтських сегментів, що значно зменшить витрати на розгортання мережі за рахунок більш ефективного використання смуги частот;

– Хмарна технологія радіодоступу на основі методів віртуалізації мережевих функцій у поєднанні з централізованими блоками обробки, замінить блоки розподіленої обробки сигналів на АУ та БС і, як наслідок, знизить вартість розгортання щільних мобільних мереж на основі мікросот.

Інші запропоновані удосконалення мереж зв'язку 5G включають у собі нові методи кодування сигналу та організації бездротових інтерфейсів, які забезпечать покращену спектральну ефективність мереж 5G. Крім того, периферійні обчислення (Edge Computing) стають все більш важливими для програм, що працюють у режимі реального часу. Зокрема, периферійні обчислення дозволять наблизити дані до АУ забезпечуючи низьку затримку обробки інформації.

#### 1.4 Мережі доступу 5G NR у міліметровому діапазоні

В даний час спектр міліметрового діапазону частот не використовується системами стільникового зв'язку. Причина полягає в специфічних особливостях поширення радіохвиль, включаючи високі втрати поширення, атмосферного та дощового поглинання, низької дифракції, вищого розсіювання через шорсткість матеріалів, великих втрат при проникненні через об'єкти та, крім того, через сильний фазовий шум і високі витрати на обладнання. Однак багато із зазначених недоліків, можуть бути ефективно вирішені, що дозволить використовувати новий спектр частот для мереж зв'язку 5G.

### 1.4.1 Втрати розповсюдження

Відповідно до стандартної моделі поширення Фрііса збільшення несучої частоти веде до значного збільшення втрат поширення. Однак, при однаковому розмірі фізичної апертури, що передає та приймає антени на більш високих частотах випромінюють і приймають більше енергії, використовуючи більш високі діаграми спрямованості. Наприклад, збільшення несучої частоти на порядок збільшує втрати поширення на 20 дБ. Однак, якщо апертура антени підтримується постійної на приймачі чи передавачі зі збільшенням частоти, тоді втрати у вільному просторі залишаються незмінними. Якщо апертури передавальної та приймаючої антен підтримуються постійними, то втрати у вільному просторі зменшуються зі збільшенням частоти. На практиці можна підтримувати однакову ефективну апертуру антени за допомогою антенних решіток формуючи діаграму спрямованості.

Вплив кількості антенних елементів на NR БС на відношення сигналу до шуму (ВСШ) як функція від дистанції проілюстровано на Мал. 1.4 для випромінюваної потужності  $P_T = 23$  дБм, де  $N_V$  та  $N_H$  – кількість антенних елементів у горизонтальній та вертикальній площинах, відповідно. Зазначимо, що використання антенних ґрат також дозволяє значно збільшити потенційну зону обслуговування однієї NR БС. На сьогоднішній день існують практичні реалізації антенних решіток, в яких кількість елементів перевищує 512.

### 1.4.2 Вплив погодних умов

Вимірювання впливу погодних умов на поширення міліметрових хвиль досить добре вивчені. Звернемо увагу, що найбільш істотний вплив має листя, при наявності якої у каналі, величина падіння сигналу досягає 2 дБ/м. Втрати спричинені сильним снігом, туманом та хмарами досить незначні (менше 1 дБ/км). Дощ зазвичай характеризується додатковим загасанням близько 10 дБ/км, що може вплинути на характеристики каналу зв'язку.

Додаткові втрати при поширенні міліметрових радіохвиль завдають поглинання в атмосфері. Основні компоненти відповідальні за поглинання у діапазоні частот – кисень і пари води. Графік поглинання показаний Рис. 1.9.

Особливо слід зазначити поглинання кисню, що досягає 15 дБ/км на частоті 60 ГГц . Однак, в цілому поглинання несуттєво як для зв'язку всередині приміщень, так і для передбачуваних розгортань у міських стільникових мережах, де відстань між БС становить близько 200 метрів. У цьому випадку поглинання фактично вигідно, оскільки дозволяє зменшувати завади від віддалених БС.

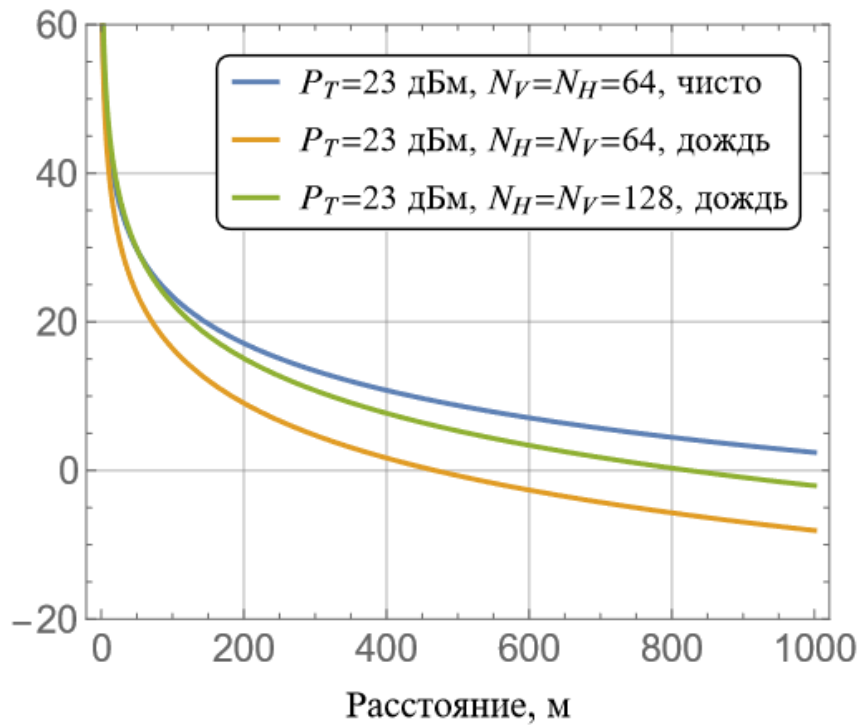


Рисунок 1.8 – ССШ як функція дистанції та погодних умов.

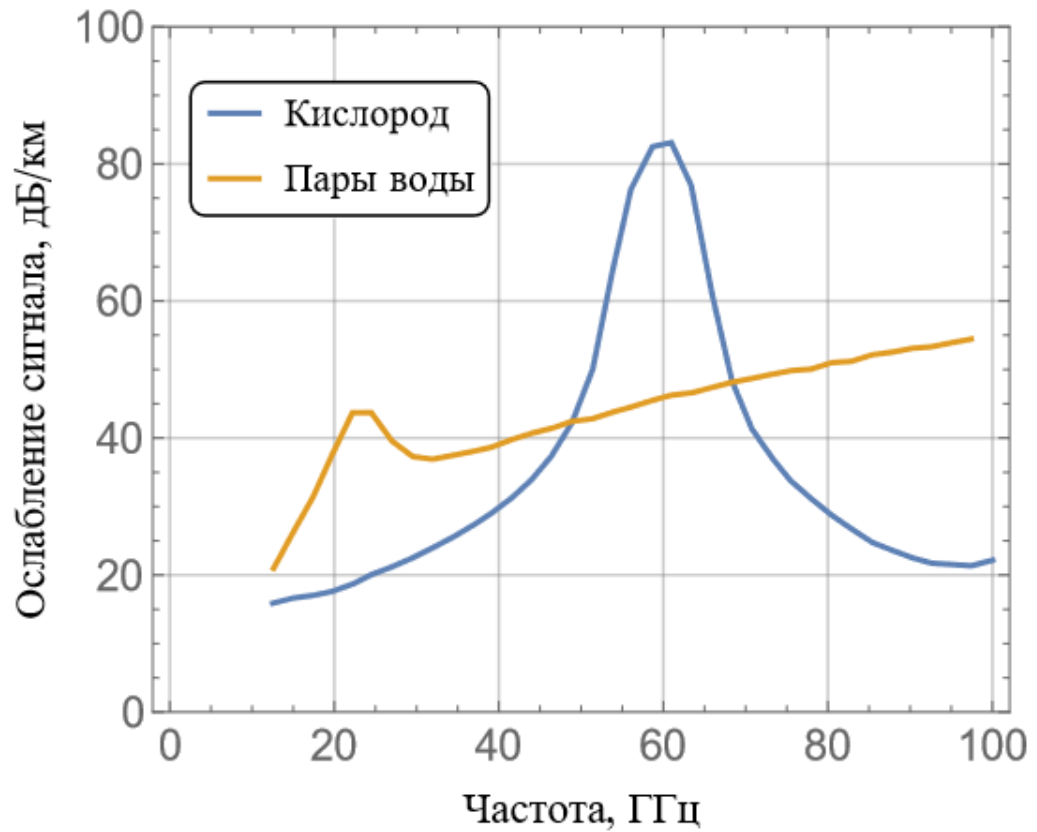


Рисунок 1.9 - Поглинання енергії міліметрових хвиль в атмосфері.

У даному розділі ми розглянули системи радіо і лінії передачі ММ ДХ. Також тенденції розвитку сучасних систем, особливості ММ ДХ, Загальну характеристику 5G та базові послуги п'ятого покоління зв'язку.

## 2. КОМПОНЕНТИ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖ ДОСТУПУ 5G NR

### 2.1 Моделі розповсюдження

Хоча електромагнітні хвилі регулюються рівняннями Максвелла з відповідними граничними умовами, взагалі неможливо мати аналітичне рішення для електромагнітного поля в реалістичному середовищі поширення. Мета моделювання поширення електромагнітних хвиль полягає в тому, щоб отримати оцінку рівня сигналу, коли задані деякі параметри системи, такі як частота, характеристики місцевості, висота антени тощо.

У випадку ОСШ на приймачі може бути записано наступним чином:

$$S(x) = \frac{P_T G_A G_U}{B N_0 L(x) C_L M_I M_S} \quad (2.1)$$

де  $B$  - смуга пропускання,  $P_T$  - випромінювана потужність,  $G_A$  і  $G_U$  - посилення антени на прийомі та передачі,  $L(x)$  - втрати при поширенні сигналу на відстані  $x$ ,  $N_0$  – тепловий шум,  $C_L$  – втрати сигналу на передавачі,  $M_I$  – перешкода,  $M_S$  – завмирання каналу пов'язані з великими об'єктами.

Зазначимо, що у (2.1) компонент  $N_0$  є константою,  $-174$  дБм/Гц. Коефіцієнт  $C_L$  залежить від технології виробництва приймача і також є константою. У загальному випадку  $M_S$  та  $L(x)$  залежать від території, на якій розгортається система і моделюються випадковими величинами.  $M_I$  є функцією щільності абонентів та NR БС, а також часто моделюється випадковою величиною.  $G_A$  та  $G_U$  залежать від типу антеної решітки, кількості антенних елементів, та орієнтації передавача та приймача відносно один одного.

Поширення радіохвиль міліметрового діапазону частот умовах міської забудови має важливі відхилення від поширення тих частотах, у яких працюють сучасні системи зв'язку четвертого покоління. Причина полягає в довжині хвилі (1 міліметр для частоти 30 ГГц) порівнянної з розмірами множини фізичних об'єктів

серед поширення. Так наприклад, шорсткості бетонних поверхонь будівель становлять значні проблеми для радіозв'язку у міліметровому діапазоні частот. Оскільки розміри таких об'єктів зіставні з довжиною хвилі замість відображення відбувається дифузійне розсіювання хвилі, що значно послаблює рівень сигналу. Розсіювання також відбувається під час проходження радіохвилі через крони дерев.

З огляду на зазначені властивості поширення можна побачити, що поширення хвиль міліметрового діапазону частот сильно залежить не тільки від геометрії навколишнього середовища. В даний час для побудови високоточних моделей поширення у специфічних умовах використовуються моделі на основі трасування променів. Метод трасування променів заснований на методах оптики та дозволяє вирішити рівняння Максвелла імітаційним шляхом. Цей метод є загальним інструментом моделювання поширення, який забезпечує оцінки втрат поширення, азимуту приходу променя (Angle of Arrival, AoA), азимуту результату променя (Angle of Departure, AoD) та затримок поширення сигналу. На відміну від теоретичних та емпіричних моделей, метод трасування променів не дозволяє отримати прості висловлювання до розрахунку втрат поширення.

Моделі, засновані на трасуванні променів, не дозволяють отримати простих виразів для втрат поширення як функції від дистанції між передавачем та приймачем. Ця властивість не дозволяє використовувати такі моделі для математичного аналізу розгортання бездротових мереж зв'язку 5G NR. Однак, такі моделі, разом із вимірами поширення радіохвиль дозволяють формулювати емпіричні моделі.

Побудова емпіричних моделей заснована на пошуку функції апроксимуючого виміру, проведені в деякій досліджуваній області. Використання емпіричних моделей обґрунтовується схожістю геометрії аналізованої області та геометрії, в якій були проведені вимірювання. Еталонним підходом вважається уточнення коефіцієнтів теоретичної моделі поширення Фрііса, яка визначається так:

$$L_{dB}(x) = 32,5 + 20\log_{10} x + 20\log_{10}(f_c) \quad (2.2)$$

де  $x$  – відстань між передавачем та приймачем у кілометрах,  $f$  – несуча частота у МГц.

Стандарт 3GPP TR 38.901 [129] визначає кілька емпіричних моделей для хвиль міліметрового діапазону частот. Основна відмінність між моделями полягає в аналізованій геометрії сценарію. В прикладних дослідженнях найчастіше використовують модель міського каньйону (Canyon-Street Urban Micro, UMi), яка представлена наступним виразом:

$$L_{dB}(x) = 32,4 + 20 \cdot 0 \log_{10} + 20 \log_{10}(f_c) \quad (2.3)$$

і яка практично збігається із моделлю Фрііса.

Модель у вигляді (2.3) надає усереднене значення втрат поширення на деякій відстані від передавача і не враховує додаткових ефектів, таких як завмирання, блокування тощо. Також зазначимо, що у математичних дослідженнях бездротових мереж доступу часто використовують модель, що виражає втрати поширення в лінійній шкалі:

$$L(x) = Ax^{-\gamma} \quad (2.4)$$

Очікується, що системи зв'язку 5G NR, що працюють у міліметровому діапазоні частот, будуть використовувати високу спрямованість антен як на передавальній, так і на стороні, що приймає. Для входження у зв'язок такі системи мають використовувати алгоритми пошуку променя. Для цих алгоритмів важливі не усереднені втрати поширення певної дистанції від передавача, а кількість шляхів поширення існуючих між взаємодіючими пристроями та його різні характеристики.

Крім усереднених моделей розповсюдження стандарт 3GPP TR 38901 визначає тривимірну кластерну модель поширення. Ця модель передбачає, що потужність складається з потужностей, що надходять від ряду, так званих, кластерів, включаючи шлях LoS та кілька відбитих компонентів. Таким чином, модель пов'язує специфіку середовища поширення міліметрового діапазону частот (i) зенітом приходу/виходу променя (Zenith of Arrival, Zenith of Departure, ZoA/ZoD) та азимутом приходу/виходу променя (Angle of Arrival, Angle of Departure, AoA/AoD) кластера, (ii) затримкою кожного кластера та (iii) часток потужності, що вноситься кожним кластером. Однак, побудова моделі включає складні функції випадкових величин, що ускладнює її використання у прикладному аналізі мереж зв'язку 5G NR.

## 2.2. Моделі антен

Розглянемо модель антени у якій діаграми спрямованості як у напрямі передачі, так і в напрямку прийому мають однакову форму, але різні вертикальні та горизонтальні спрямованості. Одним з можливих варіантів такої моделі є модель з пірамідальною зоною, яка визначається вертикальними та горизонтальними кутами, .рис 2.1. Ця модель є теоретичною абстракцією діаграм спрямованості, припускаючи деяку постійну потужність основної пелюстки антени. Зазначимо, що модель також не враховує втрати потужності на бічні та задні пелюстки.

Щоб визначити коефіцієнт посилення антени  $G$ , що відповідає певним значенням  $(\alpha_V, \alpha_H)$ , зауважимо, що площа поверхні хвильового фронту дорівнює площі сферичного прямокутника, показаної Рис. 2.1.

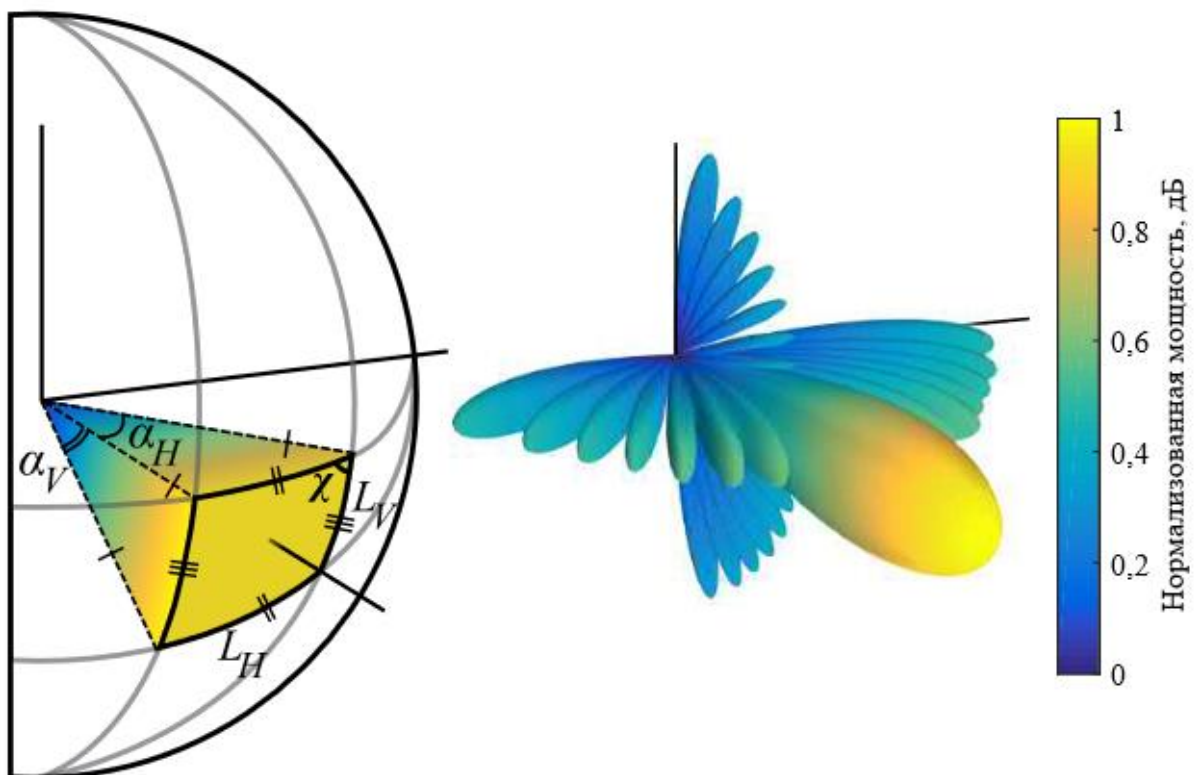


Рисунок 2.1 – Тривимірна модель діаграми спрямованості

Нагадаємо, що чверть сферичного прямокутника дорівнює  $(\rho - \pi/2)$ , див. 2.1, приводячи до наступного виразу

$$\cos\left(\rho - \frac{\pi}{2}\right) = \tan\left(\frac{L_H}{2}\right) \tan\left(\frac{L_V}{2}\right) \quad (2.5)$$

Сферичні геодезичні лінії  $LH$  і  $L_V$  відповідають кутам спрямованості  $\alpha_H$  і  $\alpha_V$  відповідно. Відповідно, площа сферичного прямокутника дорівнює

$$S_A = 4 \arcsin\left(\tan \frac{\alpha_V}{2} \tan \frac{\alpha_H}{2}\right) \quad (2.6)$$

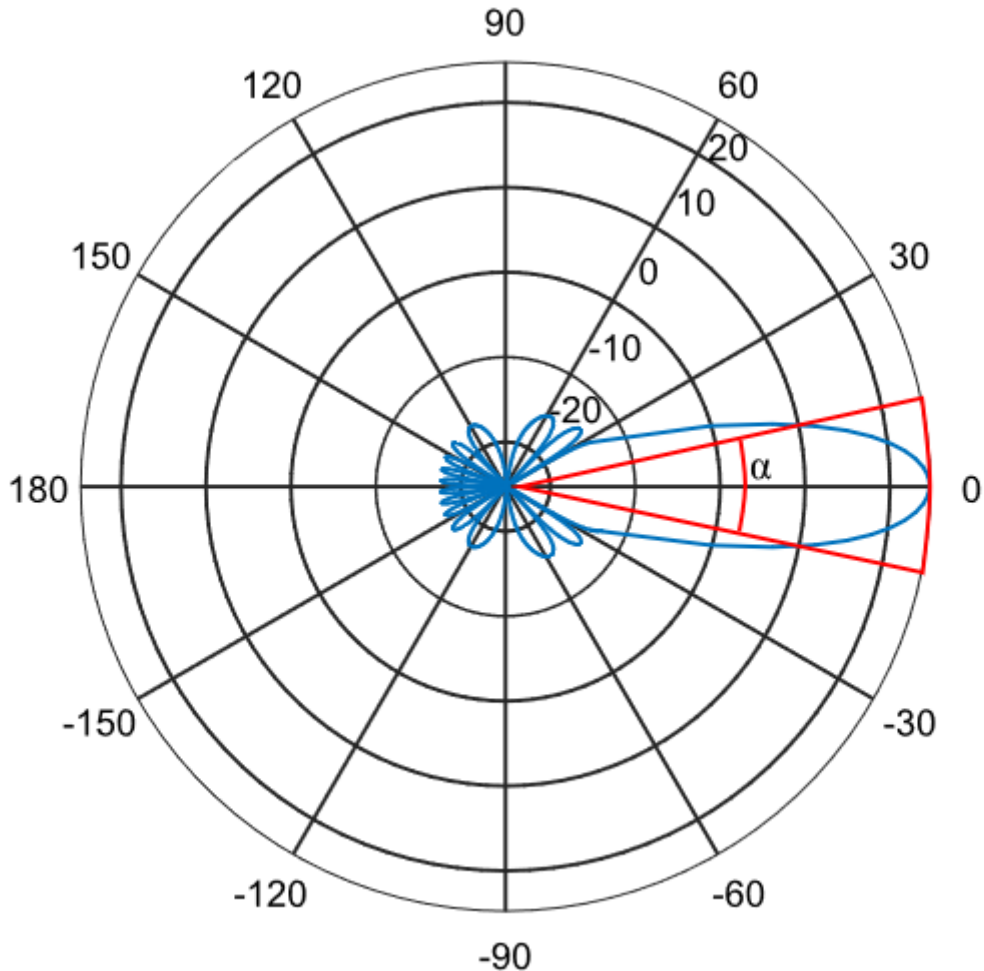


Рисунок 2.2 - Двовимірний модель діаграми спрямованості

Приватним випадком тривимірної моделі є так звана трикутна модель антени, проілюстрована на Рис. 2.2. Щоб параметризувати таку модель необхідно визначити посилення антени  $G$  для однієї пелюстки з кутом спрямованості  $\alpha$ .

Зазначимо, що дві моделі, зазначені вище, можуть бути параметризовані кутом спрямованості головної пелюстки антени. Проте, на практиці, для реалістичних антенних ґрат цей кут є функцією кількості антенних елементів.

Проілюструємо процес параметризації моделі антеної решітки на прикладі розглянутому автором.

Розглянемо антенну решітку, наведену на Рис. 2.3.

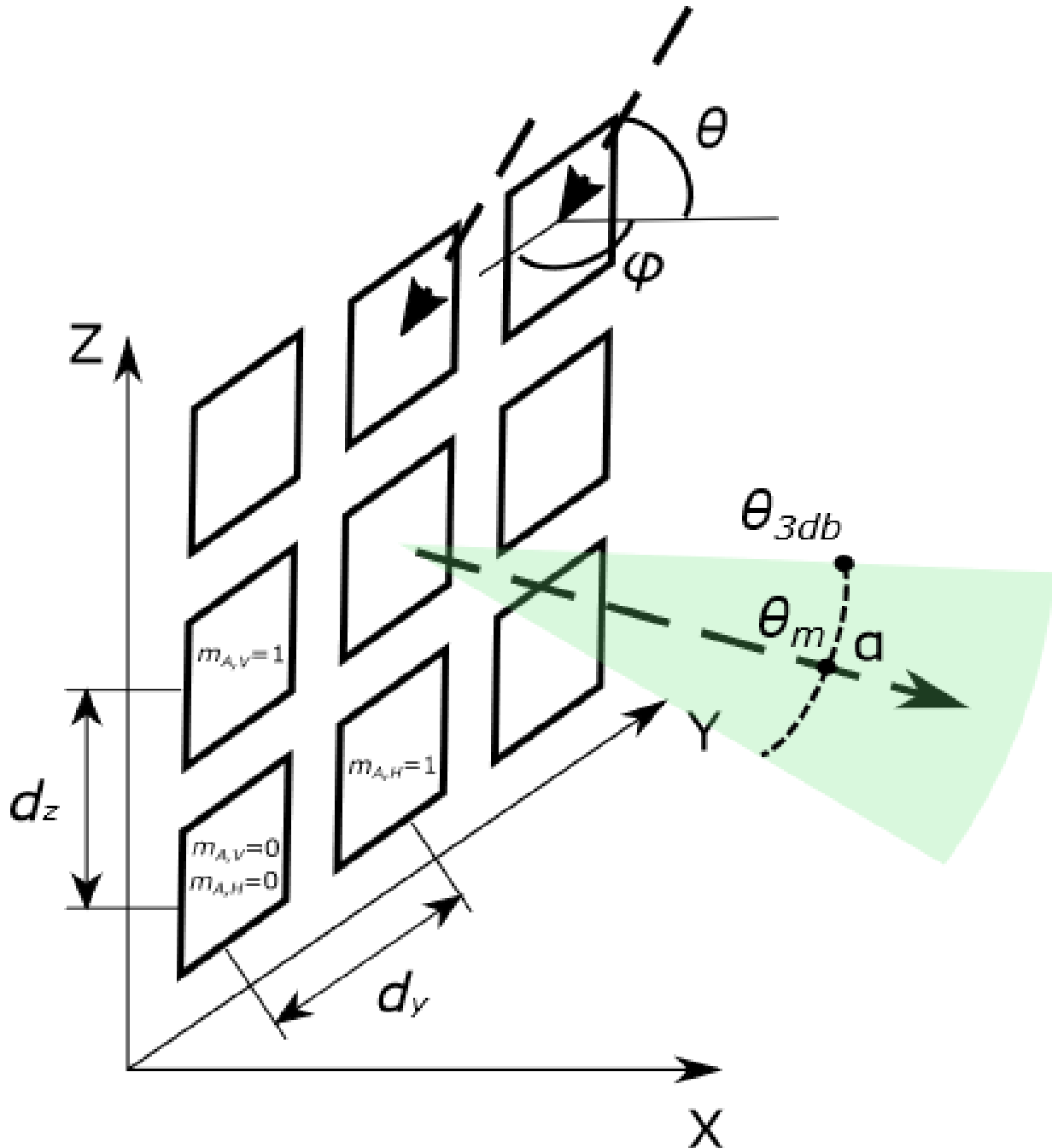


Рисунок 2.3 - Ілюстрація антеної решітки та її параметрів

Ширина променя половинної потужності (Half-Power Beamwidth, HPBW) антеною решітки,  $\alpha$ , пропорційна кількості елементів у відповідній площині та розраховується як:

$$\alpha = 2|\theta_m - \theta_{m3db}| \quad (2.7)$$

Залежно від параметрів системи можна використовувати різні моделі діаграми спрямованості антени. Якщо кількість елементів формує діаграму у вертикальній площині досить мало (що очікується на перших етапах розгортання мереж 5G NR), а дистанція взаємодії між пристроями велика, спрощена двовимірна модель надає досить хорошу апроксимацію. В іншому у випадку, як показано в необхідно використовувати тривимірну модель. Діаграма чутливості приймача моделюється аналогічним чином.

Також зазначимо, що всі представлені вище моделі не враховують втрати потужності на бічні пелюстки. Однак цей ефект досить просто врахувати як у тривимірній, так і двомірній моделі припустивши, що втрачена потужність поступово розсіюється на всі боки, крім головної пелюстки. Один із варіантів такої моделі, так звана модель “конус плюс сфера”.

### 3. ВИКОРИСТАННЯ ПРЯМИХ З'ЄДНАНЬ МІЖ ПРИСТРОЯМИ ВКРАЙ ВИСОКИХ ЧАСТОТ

#### 3.1 Доцільність та варіанти використання прямих з'єднань

##### 3.1.1 Обґрунтування та застосування зв'язку «пристрій – пристрій»

Розвиток систем зв'язку 5G зачіпає різні компоненти стільникової архітектури, у тому числі й ті, що відповідають за обслуговування трафіку від всіляких мобільних пристроїв. У міру зростання обсягів переданих абонентських даних мережева інфраструктура ущільнюється, що пов'язано зі зменшенням зон покриття малих сот і збільшенням їх кількості в областях значної завантаженості. Ущільнення мережі дозволяє підвищити ємність системи зв'язку і якість з'єднання користувача за рахунок скорочення його довжини. Однак збільшення щільності мережевого покриття тягне за собою суттєве зростання витрат з боку мобільного оператора, а також ускладнює керування інтерференцією. Як наслідок, потрібні альтернативні підходи до поліпшення якості зв'язку, вільні від цих недоліків.

Відомо, що значну частку абонентського трафіку становлять дані пірінгових (P2P) додатків [17], користувачі яких перебувають у безпосередньої близькості один до одного. Така структура трафіку надає унікальну можливість вивантажувати відповідні дані із стільникової системи зв'язку на прямі з'єднання «пристрій – пристрій», які зазвичай коротше, а відповідні абонентські термінали розміщені нижче порівняно із традиційними інфраструктурними вузлами. Ефективні механізми виявлення P2P-сусідів, встановлення зв'язку D2D і підтримки безперервного з'єднання дозволяють мобільним операторам застосовувати цю форму вивантаження трафіку для зниження завантаження стільникової мережі доступу без залучення додаткових витрат або навіть із отриманням прибутку.

З точки зору абонентів системи зв'язку, переваги технології D2D очевидні: вона дозволяє збільшити швидкість передачі, знизити затримку за її доставки і

підвищити енергетичну ефективність з'єднання [5]. Такі можливості особливо привабливі у зв'язку з бурхливим зростанням числа додатків, які можуть використовувати географічну близькість абонентів для покращення якості передачі даних. Це обумовлює активні дослідження технології D2D як в академічній, так і в індустріальній сфері. наступною швидкою стандартизацією. Зв'язок D2D має безліч застосувань, таких як локальні голосові послуги (вивантаження дзвінків між близько розташованими абонентами), обмін мультимедійною інформацією, ігрові програми, групове мовлення, контекстні послуги та служби громадської безпеки [18].

Однак залежно від характеристик руху абонентів певні послуги можуть бути більш менш придатні для вивантаження на прямі з'єднання «пристрій – пристрій» [19]. Наприклад, якщо термінали D2D значною мірою рухливі, стан каналу зв'язку може сильно змінюватися в часі, ускладнюючи тим самим підтримання якості роботи програми. Тоді кращими кандидатами для вивантаження є стійкі до затримки послуги, які можуть використовувати буферизацію у разі розриву D2D-з'єднання або перемикатися назад на інфраструктурний зв'язок (наприклад, відео на запит або передача файлів). Навпаки, якщо термінали D2D малорухливі, то безліч придатних до розвантаження послуг розширюється і включає групові потокові програми, а також розраховані на багато користувачів ігри.

### 3.1.2 Альтернативні радіотехнології для з'єднань D2D

З огляду на широкий спектр потенційних додатків та послуг зв'язку, які можуть використовувати з'єднання D2D, ця технологія була запропонована і досліджена, а також безлічі наступних після цієї роботи. Спочатку замислювалося, що шар D2D функціонуватиме як «підкладка» стільникової системи, що працює в тому ж діапазоні радіочастот, а термінали D2D будуть підлаштовувати свою потужність передачі так, щоб зменшити інтерференцію з користувачами стільникової мережі. На сьогоднішній день можливість встановлення з'єднань D2D у ліцензованому спектральному діапазоні добре вивчена теоретично, проте стандартизація цієї концепції зіткнулася з низкою труднощів, наприклад, висока складність відповідного управління системою зв'язку, і це ускладнює реалізацію цього підходу практично.

На відміну від «підкладки» D2D у ліцензованому спектрі, протоколи встановлення прямого з'єднання на неліцензованих частотах вже доступні на ринку, і вони можуть бути використані в системах D2D. До жаль, у більшості наявних рішень процес виявлення сусідів занадто енерговитратний, встановлення прямої сполуки утруднено, відсутні надійні засоби підтримки безперервності зв'язку, а управління радіоресурсами часто неефективно. Однак усі перераховані недоліки та обмеження можуть бути частково або повністю усунуті застосуванням мережевого сприяння, яке забезпечить абонентські термінали додатковими відомостями, доступними ліцензованої мережі мобільного оператора та корисними для забезпечення ефективної роботи в неліцензованому спектральному діапазоні.

Зв'язок D2D у ліцензованому спектрі. Ліцензований спектр являє собою обмежений і дорогий ресурс, і незважаючи на безперервні спроби звільнити додаткові частоти потреб мобільного зв'язку, їх виявляється недостатньо для задоволення поточної потреби. Таким чином, стільникові оператори зацікавлені у пошуку методів, що дозволяють підвищити ємність вже наявних покриттів. Технологія D2D з мережевим сприянням є при цьому перспективним перспективним напрямком, що підтверджується швидко зростаючою кількістю робіт в даній області, які припускають різні рівні інфраструктурної підтримки. З одного боку, розглядається найпростіша форма мережевого сприяння для синхронізації взаємодіючих терміналів (наприклад, в системі Aura net ). З іншого боку, стільникова мережа може безпосередньо управляти D2D-з'єднання у вигляді «підкладки» .

Управління інтерференцією, включаючи контроль доступу до мережі та призначення потужності передачі, потрібне в цьому випадку для підтримки множини сусідніх з'єднань D2D. Дослідницькі роботи пропонують способи зниження інтерференції, що враховують стан каналу зв'язку CSI, розташування абонента і т.д. Такі підходи мають на увазі, що D2D-з'єднання використовують ліцензовані спектральні ресурси разом із традиційними стільниковими з'єднаннями; використовують виділені радіоресурси або не встановлюються та дані передаються стільниковою інфраструктурою. Процес прийняття рішення на користь будь-якого з

цих варіантів отримав назву вибору режиму передачі та був вивчений у великій кількості робіт, що ставлять різні оптимізаційні завдання у термінах SINR, пропускної спроможності, енергетичної ефективності, затримки передачі, справедливості планування радіоресурсів та ймовірності блокування.

Взагалі кажучи, опубліковані результати досліджень технології D2D розрізняються за кількістю аналізованих взаємодіючих вузлів (базових станцій, стільникових терміналів та D2D-користувачів), за припущенням про передачу даних по лінії вниз або вгору, за способом виділення радіоресурсів (ортогональне або неортогональне), за обсягом доступного мережевого сприяння, а також за типом дуплексування стільникових та D2D-з'єднань. Більшість існуючих робіт передбачає інтеграцію з'єднань D2D з стільниковою системою зв'язку LTE комітету 3GPP. Однак ряд статей також приділяє увагу мережам попередніх поколінь. На практиці технологія FlashLinQ задає розподілену систему зв'язку D2D, яка використовує стільникову мережу виключно з метою синхронізації.

При використанні зв'язку D2D у ліцензованому спектрі для розвантаження системи LTE розроблено безліч різних методів підвищення її продуктивності, таких як схеми MIMO, придатні для роботи зі з'єднаннями D2D, відповідні техніки мережевого кодування, підходи до послідовного погашення інтерференції та способи доставки відеоданих поверх D2D. Можна зробити висновок, що з урахуванням систематичних результатів дослідження систем D2D, представлених у роботах, цей напрямок є добре вивченим. У відповідь на це комітет 3GPP вже кілька років тому розпочав стандартизацію технології LTE-Direct, яка є синхронною системою зв'язку в ліцензованому спектрі під повним контролем мобільного оператора. Однак безліч технічних проблем і розбіжностей розробки такого рішення затримали випуск відповідних ринкових товарів, що у результаті змістило увагу убік реалізації з'єднань D2D на неліцензованих частотах.

Зв'язок D2D у неліцензійному спектрі. У неліцензованому спектрі, наприклад, у частотному діапазоні для промислового, наукового та медичного застосування ISM, заборонено ексклюзивне використання радіо частот. У результаті цих частот може виникнути значної неконтрольованої інтерференції, яка, у свою чергу,

потребує надійної технології радіодоступу, стійкою до випадкових флуктуацій перешкод. Сучасні системи Bluetooth та WiFi були розроблені з урахуванням цього факту і, тим самим, стали широко поширюватися в бездротових персональних та локальних мережах доступу (WPANs/WLANs). Заснована на сімействі стандартів IEEE 802.11 технологія WiFi є найбільш популярним рішенням для зв'язку на неліцензованих частотах як в інфраструктурному режимі, і при прямому взаємодії пристроїв.

На жаль, у традиційних мережах WLAN інфраструктурні ТД (точки доступу) не мають механізмів безпосереднього управління радіоресурсами користувачів, які вони обслуговують, які змушені конкурувати за можливість передачі у розподіленому режимі. З цієї причини системи WiFi часто критикують за відсутність строгих гарантій якості обслуговування. При цьому WiFi-з'єднання часто отримують вищі швидкості передачі даних та енергетичну ефективність порівняно з альтернативними технологіями, тому цілий ряд досліджень спрямований на підвищення стабільності при передачі даних без безпосередньої участі ТД. Порівняно недавно була розроблена технологія WiFi Direct (WFD), яка дозволяє абонентським терміналам з'єднуватися та обмінюватися інформацією навіть за відсутності інфраструктури ТД WiFi шляхом призначення одного з пристроїв «власником групи», тоді як інші вузли стають його «клієнтами». Кожен «власник групи» WFD надає синхронізацію всім підключеним до нього «WFD-клієнтам», допомагаючи їм виявляти сусідів та підключатися один до одного.

Оскільки просунуті абонентські термінали вже підтримують технологію WFD, а ТД WLAN продовжують поширюватися повсюдно, рівень інтерференції у неліцензованому спектрі ISM неухильно зростає. У цих умовах користувачі послуг WLAN можуть отримати суттєві переваги від передачі контролю за призначенням радіоресурсів, а також ряду інших процедур деякої централізованої функції управління, яка розміщена на стороні стільникової системи зв'язку. Централізована мережа може полегшити вирішення завдань із синхронізації вузлів, керування радіоресурсами та виявлення інших пристроїв/послуг. Якщо абонентські термінали безперервно асоційовані з деякою сотою, вона також може сприяти призначенні

кращої радіотехнології (LTE/WFD), керуванні потужністю, контролю доступу до середовища та виборі формату передачі (модуляційно-кодова схема, режим використання MIMO тощо). Крім того, за допомогою цієї стільникової мережі спрощується процес автентифікації пристроїв та забезпечення безпеки з'єднань D2D.

Як зазначалося вище, багато сучасних пристроїв зв'язку реалізують підтримку WFD та їх частка швидко зростає. Ця обставина обумовлює необхідність зниження витрат на передачу сигнальних повідомлень між ними. Отже, постачання перспективних систем D2D деякою формою мережевого сприяння при роботі в неліцензованому спектрі може бути дуже переважною як альтернативу безпосередньому управлінню D2D-з'єднаннями на ліцензованих частотах. Як архітектура, так і функції управління традиційними системами зв'язку повинні бути в такому разі переглянуті та доповнені функціоналом виявлення необхідних пристроїв/послуг, а також відстеження їх переміщення. При цьому передбачається, що абонентські термінали, як і раніше, відповідають Ственни за підтримку необхідної якості зв'язку і перемикаються назад на стільникову інфраструктуру за недостатньої швидкості з'єднання D2D.

### 3.1.3 Виявлення сусідів та встановлення з'єднання D2D

Для забезпечення роботи системи D2D потрібно виконати два основних кроку: виявити сусідів та встановити пряме з'єднання. В принципі, обидва ці дії можуть бути організовані розподілено, але мережеве сприяння надає у зв'язку з цим ряд важливих переваг. Оскільки стільникова мережа здатна відстежувати місцезнаходження абонентських терміналів, що обслуговуються нею, вона може значно знизити частку часу, яку термінал витрачає на виявлення інших пристроїв або послуг, інформуючи його тоді, коли вони опиняються поблизу. Така підтримка дозволяє терміналам не використовувати радіотехнологію D2D для виявлення та перемикатися на її тільки в момент безпосереднього встановлення з'єднання, що економить як ресурси акумуляторної батареї, і радіоресурси.

Більше того, оскільки стільникова система зв'язку має засоби без небезпечного доступу до всіх своїх користувачів (а також до абонентів мереж інших операторів через відповідні протоколи взаємодії), вона може зробити безпечне виявлення

«незнайомих» пристроїв, що підвищує доступність даних та/або послуг. Іншими словами, знімаються обмеження традиційних способів виявлення, які пропонують пошук тільки серед «знайомих» пристроїв, що надають дані/послуги, або ж вимагають встановлення серії безпечних з'єднань з «незнайомими» пристроями в пошуку потрібних даних/послуг. За наявності мережевого сприяння абонентський термінал отримує можливість безпосереднього доступу до такої інформації, а стільникова система зв'язку інформує його, коли довірений пристрій, надає цільові дані/послугу за технологією D2D, надається до досить близько для встановлення прямого з'єднання.

Інша важлива перевага мережевого сприяння у тому, що вона дозволяє зберегти анонімність абонентських терміналів у процесі виявлення сусідів та встановлення з'єднання D2D шляхом маскувannya їх вихідних ідентифікаторів. Таким чином, термінали ідентифікують себе на рівні додатків і далі використовують тимчасові ідентифікатори каналного рівня для роботи зі з'єднанням D2D, що дозволяє їм залишатися анонімними для всіх пристроїв мережі, крім своїх безпосередніх D2D-партнерів. Виявлення сусідів з допомогою механізмів мережевого сприяння як із виборі партнера, і під час пошуку необхідних даних/послуг то, можливо реалізовано різними способами. Найбільш послідовним та ефективним рішенням є розміщення функціоналу управління доступними даними/послугами на сторонніх серверах P2P, тоді як контроль над виявленням і з'єднанням D2D проводиться в 3GPP-мережі мобільного оператора.

На рисунку 3.1 представлені учасники типової сесії P2P. Більшість наявних P2P-сервісів надають функціонал відстеження даних/послуг (контенту) для обміну, який, як правило, розташовується на сторонньому сервері програм. Останній є довіреним сервер, розміщений у мережі Інтернет, до якого отримують доступ усі зареєстровані абоненти. Спеціалізований модуль відстеження контенту протоколює всі доступні дані/послуги, якими обмінюються користувачі, аутентифікує їх та авторизує доступ до контенту. У традиційних хмарних сервісах така функція відстеження контенту зазвичай суміщена із системою для його доставки, яка регламентує процес обміну. Дана структура характерна для більшості сучасних

соціальних мереж, таких як Facebook (що використовує Akamai для доставки контенту), YouTube (що використовує виділений набір серверів для зберігання даних та взаємодії з користувачем) та безліч інших.

Для спрощення роботи програм P2P поверх з'єднань D2D модуль відстеження контенту повинен також зберігати інформацію про місцезнаходження всіх даних/послуг, що надаються зареєстрованими користувачами ми. Наприклад, модуль відстеження контенту для YouTube зберігатиме адреси всіх Інтернет-серверів, які містять шукане відео, а також запам'ятовувати ідентифікатори абонентів, які пропонують завантажити це відео через інфраструктурні або D2D-з'єднання. У такому разі розглядається модуль передає користувачеві, що запитує це відео, список альтернативних джерел для його завантаження. На жаль, поки що з'єднання D2D не встановлено, воно може керуватися традиційними методами. Для цього в систему вводиться новий довірений сервер, який називається сервером D2D. Він знаходиться в опорній мережі стільникового оператора і розповідає управлінням з'єднань у процесі виявлення сусідів та встановлення зв'язку D2D (див. рисунок 3.2).

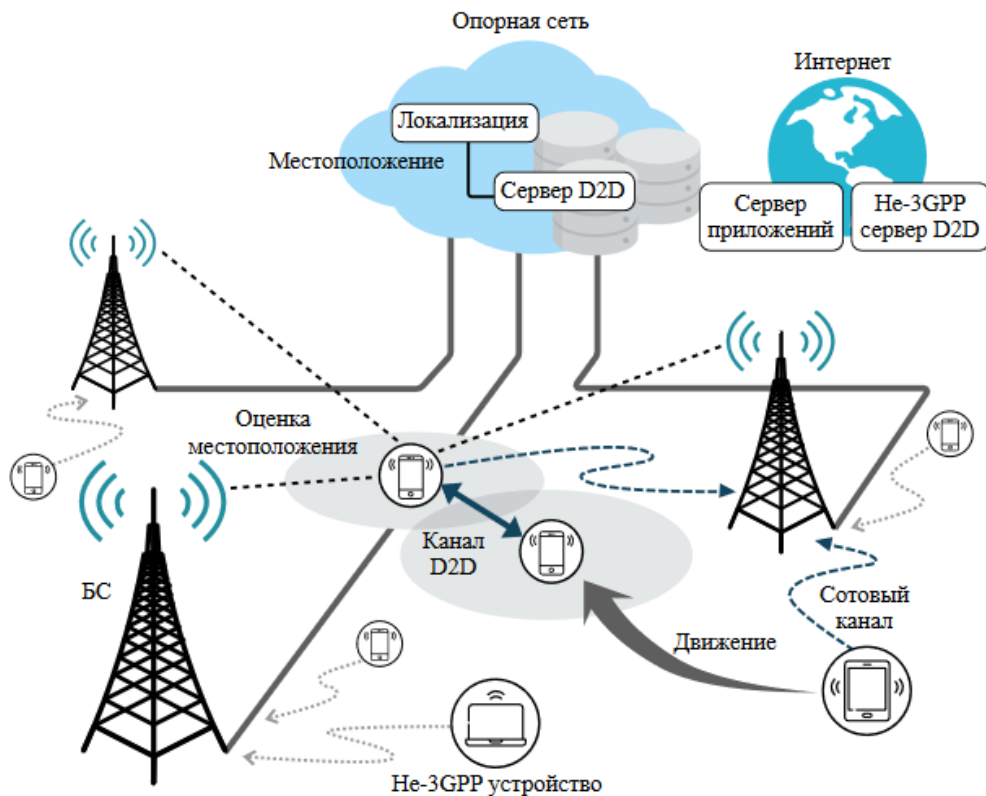


Рисунок 3.1 - Приклад роботи системи вивантаження на основі з'єднань D2D

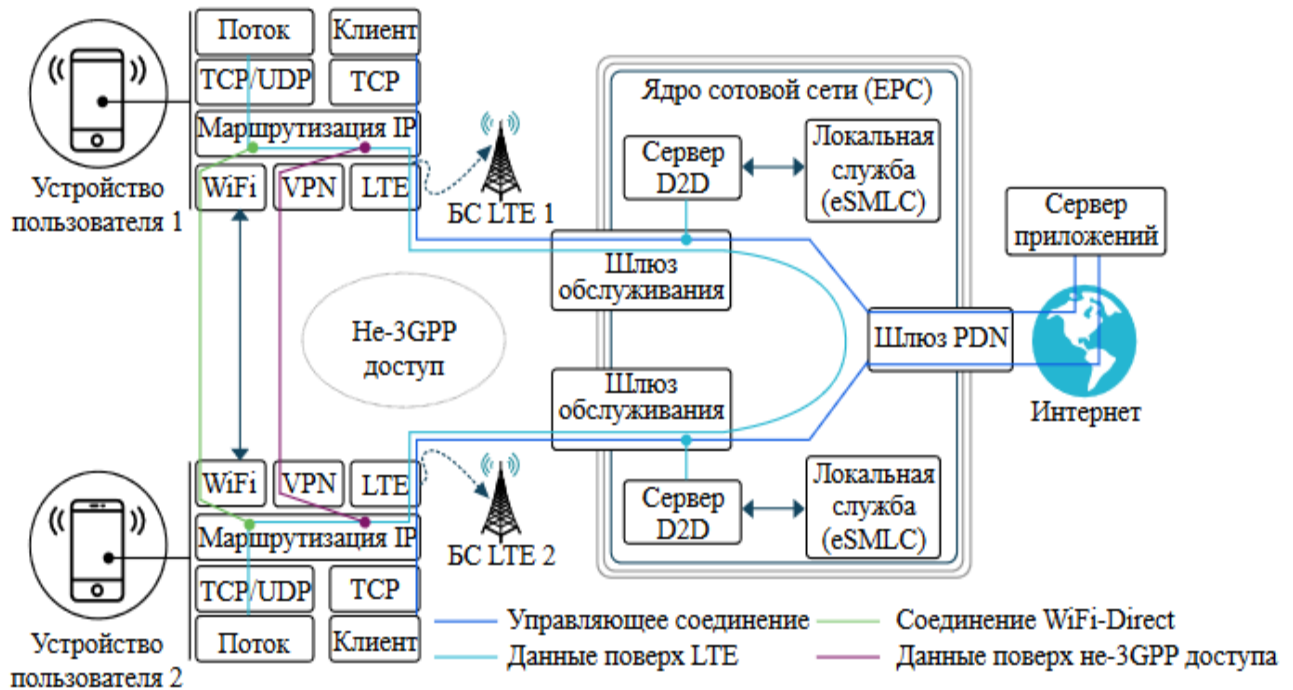


Рисунок 3.2 - Архітектура системи вивантаження на основі з'єднань D2D

Пропоноване розміщення сервера D2D в опорній мережі мобільного оператора (при розгляді стільникової системи 3GPP) має низку додаткових переваг. По-перше, при порушенні будь-яким абонентським терміналом правил роботи, встановлених в мережі D2D, він може бути остаточно виключений із системи на підставі апаратної адреси. По-друге, мережне сприяння може бути реалізовано через керуючі з'єднання 3GPP, що гарантує низьку затримку кругової між сервером D2D та абонентським терміналом навіть при високому завантаженні системи зв'язку. Нарешті, перебуваючи в ядрі мережі, сервер D2D отримує безпосередній доступ до функцій локалізації користувачів для відстеження їхнього поточного розташування.

### 3.2 Використання прямих з'єднань на не ліцензованих частотах

#### 3.2.1 Вивчення зв'язку D2D у неліцензованому спектрі

Радіоресурси сучасних систем зв'язку можуть використовуватися недостатньо, крім ситуацій підвищеного завантаження у певних областях (годин пік, масові заходи тощо). Як наслідок, характеристики роботи мереж 5G, у тому числі

підтримують прямі з'єднання D2D, значною мірою залежать як від інтенсивності надходження на обслуговування нових абонентських сесій, і від географічного розташування відповідних терміналів. Таким чином, розміщення вузлів мережі у просторі важливо враховувати разом із динамікою її трафіку у часі. У зв'язку з цим багато обіцяючим напрямом стає використання просторово-часового принципу, що комбінує методи стохастичної геометрії з підходами теорії масового обслуговування.

Застосування теорії масового обслуговування дозволяє моделювати динаміку системи на рівні сесій, які надходять до неї на обслуговування і покидають її у міру його завершення. Для з'єднань D2D сесія є потік даних реального часу від одного абонента мережі до іншого. У цьому розділі розглядається виникнення нових сесій згідно з пуассонівським точковим процесом PPP, який часто застосовується в дослідницьких роботах для аналізу взаємодії стільникових та локальних мереж, для вивчення способів виявлення сусідів під час роботи технології FlashLinQ, для обліку продуктивності багат шарових гетерогенних систем, а також для опису розподілів випромінюваної потужності та значення SINR у мережах D2D. Однак у більшості випадків використання стохастичної геометрії не дозволяє врахувати динаміку системи зв'язку у часі. Більш того, у наявній технічній літературі відсутні підходи, що дозволяють проводити просторово-часове моделювання систем D2D мережевим сприянням.

У цьому розділі пропонується новий підхід до аналізу взаємодії прямих з'єднань «пристрій – пристрій» у неліцензованому спектрі та інфраструктурних стільникових з'єднань у ліцензованому спектрі, коли мережа оператора має можливість вивантажувати абонентські сесії у шар D2D. Цікаві різні практичні сценарії такого вивантаження, алгоритми управління потоками трафіку (переважної технології радіо доступу, LTE або WFD) та характеристики роботи системи зв'язку в цілому. Наприклад, розглядаються ймовірності блокування (відмови), коли абонентська сесія не приймається на обслуговування шаром D2D, стільниковим шаром або а ними обома. При зростаючій увазі до енергетичної ефективності мобільних пристроїв з обмеженим об'ємом акумуляторної батареї, також важливо

оцінити енергетичне споживання типової абонентської сесії з урахуванням моделі споживання потужності.

Наступний виклад націлений на побудову математичної моделі для аналізу вивантаження сесій стільникових абонентів на прямі з'єднання D2D у системах 5G, що надають мережеве сприяння. На відміну від наявних результатів зі статичним розміщенням вузлів, проведене далі моделювання дозволяє врахувати динаміку системи зв'язку у часі. Зокрема, проводиться всебічне вивчення сполук D2D, що сусідять одноразово в деякій географічній області. Оскільки зв'язок у не ліцензованому спектрі неминуче схильна до впливу інтерференції, сформульований тут підхід дозволяє в явному вигляді описувати взаємодію абонентських терміналів, що знаходяться у безпосередній близькості один до одного. При цьому передбачається, що мережа сприяє системі D2D на етапі контролю доступу до нових сесій.

Для виявлення переваги зв'язку D2D також розглядається модель традиційної стільникової мережі, яка у явному вигляді керує рівнем виникаючої інтерференції, а також вирішує завдання контролю доступу, призначення потужності передачі та планування радіоресурсів для обслуговуваних нею абонентських терміналів. Передаючи дані реального часу, термінали встановлюють рівень своєї випромінюваної потужності відповідно до підходу , і при цьому пропонуються альтернативні методи управління потоками трафіку. На цій основі проводиться імітаційне моделювання мережі 5G з з'єднаннями D2D для підтвердження правомірності використовуваних методів аналітичного моделювання, а також з метою виявлення приросту продуктивності від розвантаження стільникової системи зв'язку за допомогою прямих з'єднань між «пристрій – пристрій» за наявності мережевого сприяння.

### 3.2.2 Підхід до аналізу систем D2D

Даний підрозділ вводить у розгляд модель системи D2D, що включає безліч прямих з'єднань і традиційне стільникове покриття, які тут називаються шарами. Далі йдуть основні припущення запропонованої моделі.

Пропонований тут підхід до аналізу розглядає стільникову систему зв'язку на ліцензованих частотах, яка взаємодіє з безліччю з'єднань D2D у неліцензованому спектрі для забезпечення більш ефективного обслуговування даних від абонентських термінів лов . Передбачається, що трафік відповідає сесіям реального часу з мінімальною необхідною швидкістю передачі даних  $r$ . Для кожної сесії  $i$  вводиться передавальний термінал  $T_i$ , який стає джерелом даних, і приймаючий термінал  $R_i$ , що є відповідним отримувачем. В силу використання частотних діапазонів, що не перекриваються, передачі абонентів у двох введених шарах не інтерферують між собою, тоді як кожен  $T_i$  може відправляти свої дані  $R_i$  або через стільниковий шар (інфраструктурне з'єднання), або через шар D2D (пряме з'єднання), як показано на рисунку 3.3. Для спрощення подальших міркувань тут розглядається лише передача даних, яка призначена для отримання безпосередніх D2D-партнерів.

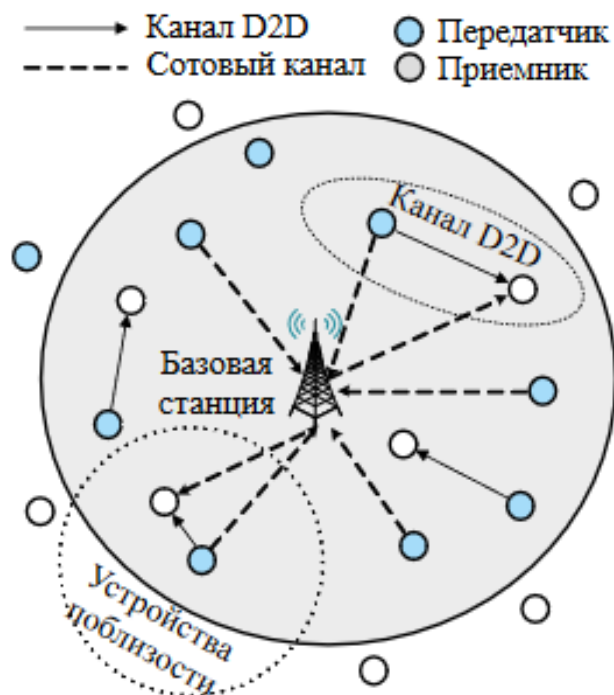


Рисунок 3.3 — Модель розвантаження стільникового трафіку на з'єднання D2D

Для моделювання просторового розташування вузлів системи у явному вигляді вводиться таке основне припущення.

Термінали, що передають, розміщені згідно з однорідним пуассонівським точковим процесом PPP у тривимірному просторі (як точки на двовірній площині, а також на осі часу) з інтенсивністю  $\lambda f(x)$ , яка не залежить від часу, де  $f(x)$  задає розподіл розташування абонентів на площині. Далі для спрощення аналізу такий розподіл вибирається рівномірним усередині кола заданого радіусу  $R$ .

Модель стільникового шару. Тут вивчається ізольована стільника централізованої мережі мобільного оператора, для якої не враховується міжстільникова інтерференція. Це спрощення призводить до розгляду системи зв'язку, не схильної до впливу будь-якої інтерференції, оскільки передачі даних від різних абонентських терміналів рознесені і не впливають один на друга. У припущенні, що відправлення інформації по лінії вниз, як правило, більш надійна і має у своєму розпорядженні велику кількість радіоресурсів, далі досліджується лише передача даних по лінії вгору, тобто. частина інфраструктурного з'єднання від користувача до стільникової БС (базової станції), що обслуговує його. Таким чином, аналіз зводиться до розгляду виключно передавальних терміналів.

Поширення радіосигналу в каналі зв'язку моделюється відповідно до документів стандартизації і з метою збереження аналітичності передбачається, що для сесії  $i$  величина SNR на одиницю потужності  $\gamma_i$  набуває вигляду

$$\gamma_i = \frac{G^K}{D_i^K} \quad (3.1)$$

Без втрати спільності також передбачається, що швидкість передачі є безперервною функцією, а відображення потужність – швидкість визначається формулою Шеннона.

Потужність сигналу  $p_i$ , що випромінюється терміналом  $i$ , і відповідна швидкість передачі даних  $r_i$  пов'язані один з одним через формулу Шеннона, яка не враховує внесок інтерференції

$$r_i = w \log(1 + \gamma_i p_i) \quad (3.2)$$

Стільникова БС управляє роботою мережі за допомогою двох альтернативних підходів, які тут називають алгоритмами передачі. Кожен алгоритм вирішує завдання допуску в мережу, управління потужністю та планування радіоресурсів.

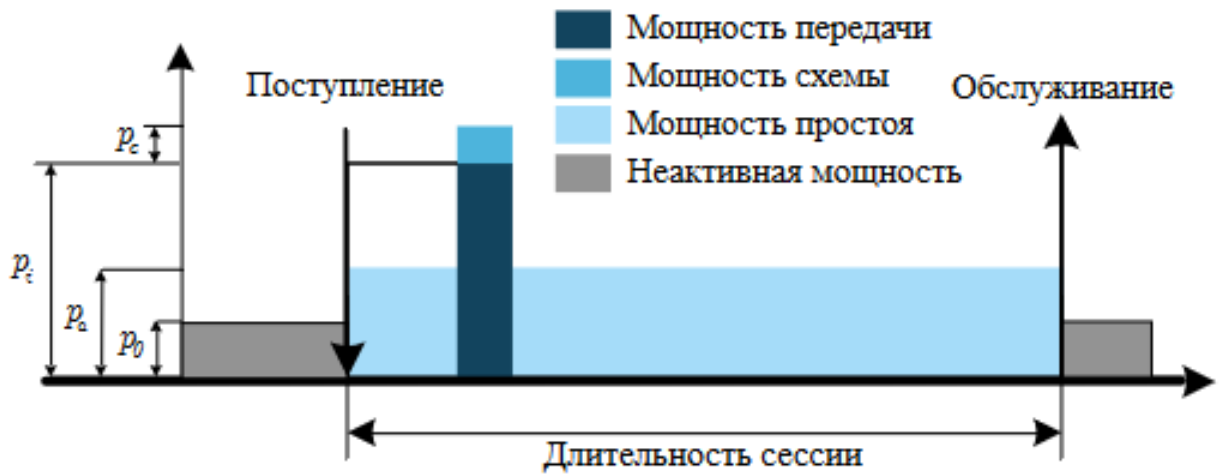


Рисунок 3.4 - Рівні споживаної передавальним терміналом потужності

При прийнятті на обслуговування передавальний термінал займає частку загального ресурсу системи в часі і встановлює свою випромінювану потужність відповідно до вказівок БС для досягнення необхідної швидкості передачі даних. БС переглядає прийняті рішення щодо призначення радіоресурсів та потужності передачі для всіх активних терміналів щоразу, коли в систему надходить нова сесія або поточна сесія завершує своє обслуговування та залишає її.

Для алгоритму передачі на максимальній швидкості (MR) передбачає ся, що термінали надсилають свої дані на гранично допустимому рівні потужності. У разі відсутності інтерференції це міркування призводить до тому, що кожен абонент отримує швидкість передачі, що дорівнює своєму найбільшому можливому значенню. З урахуванням заданого тут співвідношення миттєва швидкість передачі для сесії  $i$  встановлюється виходячи зі значення максимальної потужності передачі  $p_{\max}$ :

$$r_{\max i} = w \log (1 + \gamma_i p_{\max}) . \quad (3.3)$$

Отже, стільниковий шар допускає сесію, що знову надійшла, якщо є достатня кількість радіоресурсів для її обслуговування.

Робота системи та її характеристики. Загальний принцип роботи аналізованої системи зв'язку пояснено малюнку 3.5. Відповідно, передбачається послідовний контроль доступу з мережевим сприянням для нових сесій, що у систему. Спочатку процедура сприяння у виборі мережі доступу, що функціонує в стільниковому шарі, робить спробу вивантаження новоприбулої сесії на обслуговування в шар D2D. У разі успіху вивантажена у шар D2D сесія обслуговується в ньому без переривань до моменту свого закінчення і потім залишає систему. Інакше запускається процедура контролю доступу в стільниковий шар згідно з алгоритмом MR або FU. В Зрештою, якщо деяка сесія не може бути допущена навіть у стільниковий шар, то вона вважається остаточно заблокованою і залишає систему, не отримавши обслуговування.

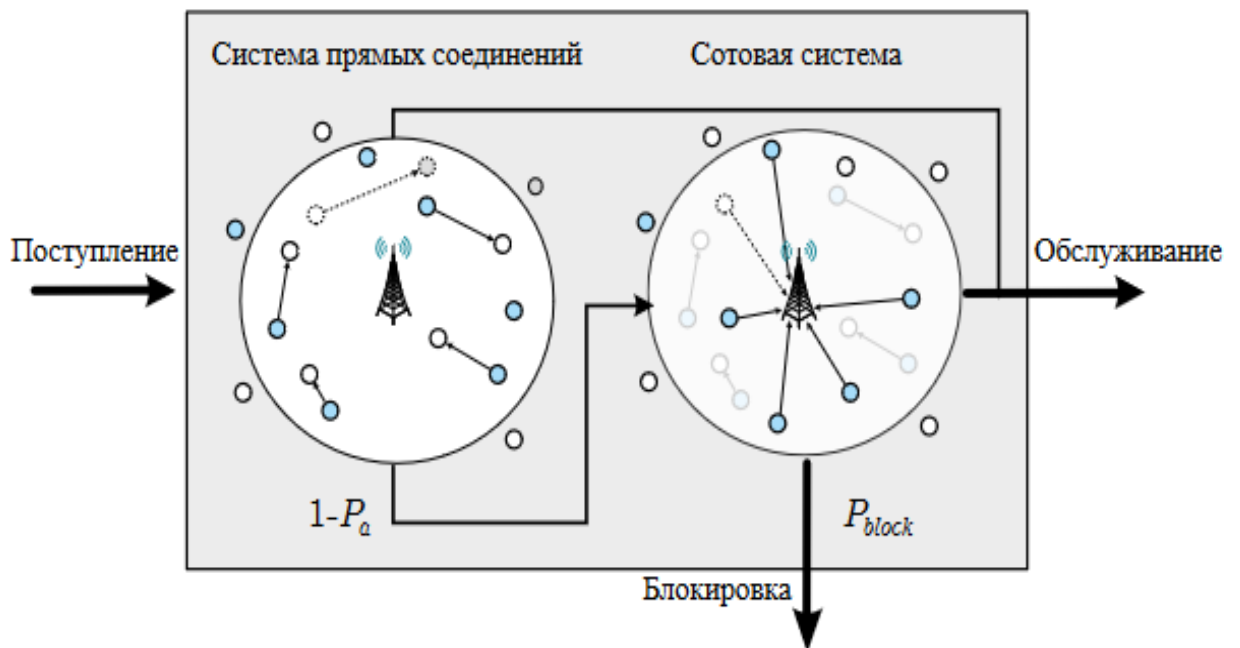


Рисунок 3.5 - Організація роботи аналізованої системи зв'язку

Слід нагадати, що вихідна інтенсивність надходження сесій на (Перший) шар D2D становить  $\lambda$ . Зважаючи на пуассонівський характер просіяного потоку, надходження сесій у (другий) стільниковий шар (тобто не прийнятих у шар D2D)

відбуваються відповідно до пуассонівського процесу інтенсивності  $\lambda(1 - P_a)$ , де  $P_a$  – ймовірність допуску сесії в шар D2D. Абстрагуючись від конкретного розташування абонентських терміналів з метою збереження аналітичності, можна припустити, що надходження сесій у стільниковий шар також відбуваються рівномірно всередині кола радіусу  $R$ . В результаті загальносистемна ймовірність блокування  $P_{block}$  може бути обчислена як

$$P_{block} = 1 - [P_a + (1 - P_b)(1 - P_a)], \quad (3.4)$$

Іншою важливою характеристикою роботи системи зв'язку, що розглядається в даному розділі є енергетичне споживання  $\epsilon$  для типової абонентської сесії за умови, що вона задовольняє вимогу щодо мінімальної швидкості передачі даних.

Застосування запропонованої моделі. На відміну від централізованих стільникових (3GPP LTE) мереж, де всі з'єднання встановлюються через БС, розподілені системи WLAN (IEEE 802.11 чи WiFi), зазвичай, надають можливість встановлення прямих з'єднань між абонентськими терміналами. Однак відсутність задовільного рішення для низки ключових завдань було тривалий час стримуючим чинником розвитку існуючих технологій зв'язку «пристрій – пристрій». Основною проблемою стає відсутність ефективних методів виявлення сусідів та встановлення/підтримання з'єднання, оскільки у розподілених мережах реалізація швидких та надійних механізмів для досягнення цих цілей є значною складністю. При цьому сучасні абонентські термінали мають можливість використовувати кілька технологій радіодоступу одночасно, і стільникова мережа може цим сприяти системі WLAN під час встановлення з'єднань D2D.

Взагалі, потенційне з'єднання D2D, яке ще не було встановлено, не може керуватися традиційними способами. Відповідно, в склад архітектури стільникової мережі повинні бути введені додаткові модулі для організації такого управління, зокрема для відстеження контенту, забезпечення безпеки, а також контролю D2D-з'єднань. В цій зв'язку необхідно провести належну ізоляцію функціоналу цих нових модулів, і в цьому розділі було запропоновано розділити функції управління з'єднанням (реалізовані сервером D2D) та функції відстеження контенту (реалізовані сервером додатків). Перевагою такого підходу є простота інтеграції технології D2D

з існуючою архітектурою системи 3GPP LTE . Далі обговорюються питання відповідності запропонованої вище моделі особливостей сучасних радіотехнологій.

Відповідно до припущень моделі системи, запропонований підхід до аналізу з'єднань D2D дозволяє моделювати динамічну взаємодію мереж 3GPP LTE та WFD (WiFi-Direct). Однак основні положення можуть бути узагальнені на випадок альтернативних способів реалізації технології зв'язку D2D, наприклад, в ліцензованому спектрі. Зокрема, припущення щодо експоненційної тривалості сесій зроблено тут виключно для наочності. Усі відповідні міркування можуть бути проведені довільного розподілу тривалості сесій. При моделюванні взаємодії систем LTE та WFD у явному вигляді важливо припустити, що всі абонентські термінали, що обслуговуються, мають хоча б два відповідних радіомодулі, що дозволяють їм використовувати обидві технології радіодоступу одноразово. Також потрібно, щоб термінали постійно підтримували активним деяке керуюче з'єднання з стільниковим БС, через яке здійснюється мережеве сприяння.

Відповідно до припущень моделі системи відображення потужність – швидкість визначається формулою Шеннона. Було наочно показано, що такий підхід може бути задовільною апроксимацією для сучасних радіотехнологій . Для подальшого наближення запропонованого тут математичного підходу до реальності можна застосувати низку додаткових обмежень, накладених використанням практичних модуляційно-кодкових схем в системі LTE та/або WFD. Зокрема, термінали, що передають, не можуть перевищити деяке максимальне значення швидкості передачі даних  $r_{\max}$  (зіставляє, наприклад, близько 60 Мбіт/с мережі LTE і 56 Мбіт/с мережі WFD), обмежуючи, таким чином, найбільшу ефективну величину SINR на приймальній стороні як

$$r_{\max} = w \log (1 + \text{SINR}_{\max}) . \quad (3.5)$$

У системі зв'язку D2D процедура контролю доступу визначає, чи може деяка сесія прийнята на обслуговування. При ідеалізованому плануванні роботи шару D2D рівень випромінюваної потужності для кожного передавального терміналу буде встановлений індивідуально, з метою максимізації, наприклад, загальної пропускну здатності мережі зв'язку. Однак реалізація такого планування на практиці не є

можливою через високі накладні витрати на передачу сигнальних повідомлень. Як наслідок, доцільне використання спрощених рішень, що відображають аналогічні підходи у системах стандарту IEEE 802.11. Відповідно передбачається, що (1) потужність передачі є постійною та (2) рівень шуму у каналі зв'язку не перевищує деякого фіксованого значення  $\theta_0$ . Щоразу, коли ця умова не виконується на приймальній стороні (або не задовольняється однією з інших приймаючих терміналів), що передає термінал відмовляється від відправлення даних та відповідний користувач залишає шар D2D.

Процедура, що розглядається тут, значною мірою повторює механізм прослуховування несучої частоти при роботі технології WFD. Він засвідчується, що рівень інтерференції, проведеної деякою передачею на кожен із приймаючих терміналів ніколи не перевищить значення  $N_0$ . При Проте, немає гарантії, що сума рівнів інтерференції, проведеної всіма активними сесіями в сукупності, не перевищить  $\theta_0$ . Враховуючи таку кумулятивну інтерференцію можна ввести додатковий коефіцієнт  $K$ . Його значення практично може бути як найбільше число потенційно інтерферуючих сполук у безпосередній близькості від терміналу, що розглядається.

У розділі було розглянуто: використання прямих з'єднань між пристроями вкрай високих частот, доцільність та варіанти використання прямих з'єднань, обґрунтування та застосування зв'язку «пристрій – пристрій», альтернативні радіотехнології для з'єднань D2D, виявлення сусідів та встановлення з'єднання D2D, використання прямих з'єднань на не ліцензованих частотах, вивчення зв'язку D2D у неліцензованому спектр, підхід до аналізу систем D2D

## 4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

### 4.1 Опис експерименту та представлення результатів

В проведенні експерименту ми використовували Комплект точок доступу Mikrotik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit) (60GHz, 1xGE, PoE In, 1Gb).

Точка доступу Wi-Fi Mikrotik RBwAPG-60ad kit є комплектом з бездротових точок MikroTik в кількості 2 штуки для гігабітних радіомістів, що виконані в корпусі компактної структури MikroTik wAP. Устаткування призначене для частот 58320 - 64800 МГц із застосуванням одного з новітніх стандартів бездротового зв'язку 802.11ad. Присутній і необхідний для підключення Ethernet-порт на 1 Гбіт з підтримкою пасивного живлення за допомогою PoE стандарту Passive PoE 802.3af at (PoE+) 12 - 57 В. Управління та контроль відбувається під керуванням RouterOS Level 3. Wireless Wire 60G -4019, у якому кожне ядро виконує функції із частотою 716 МГц. Завдання wAP 60G полягає у забезпеченні високошвидкісного з'єднання на відстанях аж до 200 м. Максимальна швидкість гарантується тільки на відстанях в межах 100 м. Оскільки має місце велике згасання сигналу, то виробник MikroTik рекомендує застосовувати RBwAPG-60ad kit на відстані до 100 м. В повнодуплексному режимі власник зможе отримати максимальну швидкість в 1 Гбіт. Використовуючи wAP 60G kit Ви зможете отримати по 950 Мбіт одночасно на відправлення та прийом.

Експеримент проводився в університеті радіоелектроніки. Приблизна відстань між точками була 90-100 метрів. Кут нахилу 30 градусів, так як одна точка знаходилася на першому поверсі, друга на третьому.

На рисунках 4.1 та 4.2 наведена карта місцевості проведення експерименту.

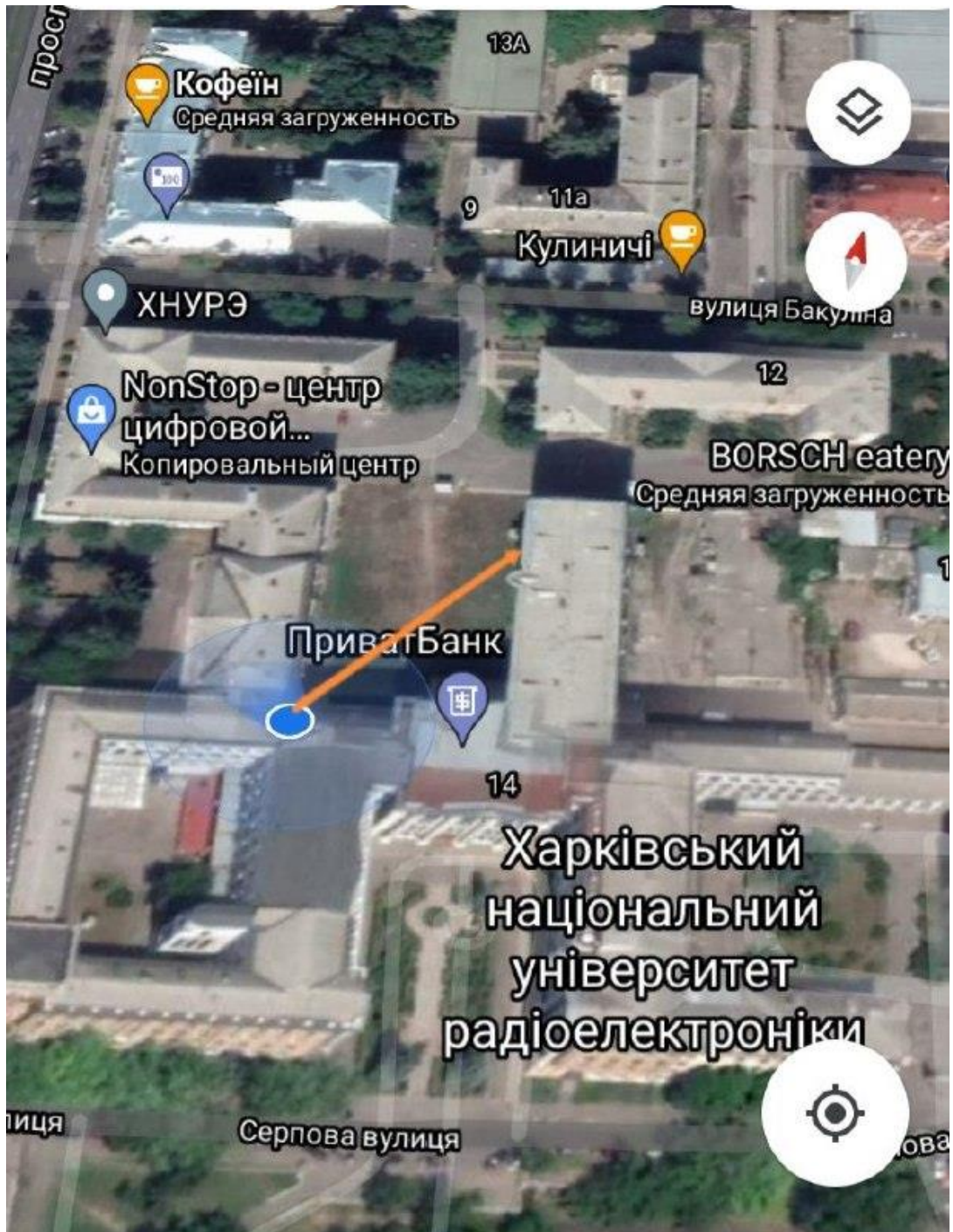


Рисунок 4.1 - Карта місцевості, відстань між точками  $\approx 90$  метрів, кут нахилу 30 градусів



Рисунок 4.2 - Фото місцевості

Експеримент проводився в ясну погоду, без опадів. Тому загасання сигналу ММ ДХ 60 ГГц було лише в кисні.

На рисунку 4.3 наведені результати з програмного забезпечення WinBox.

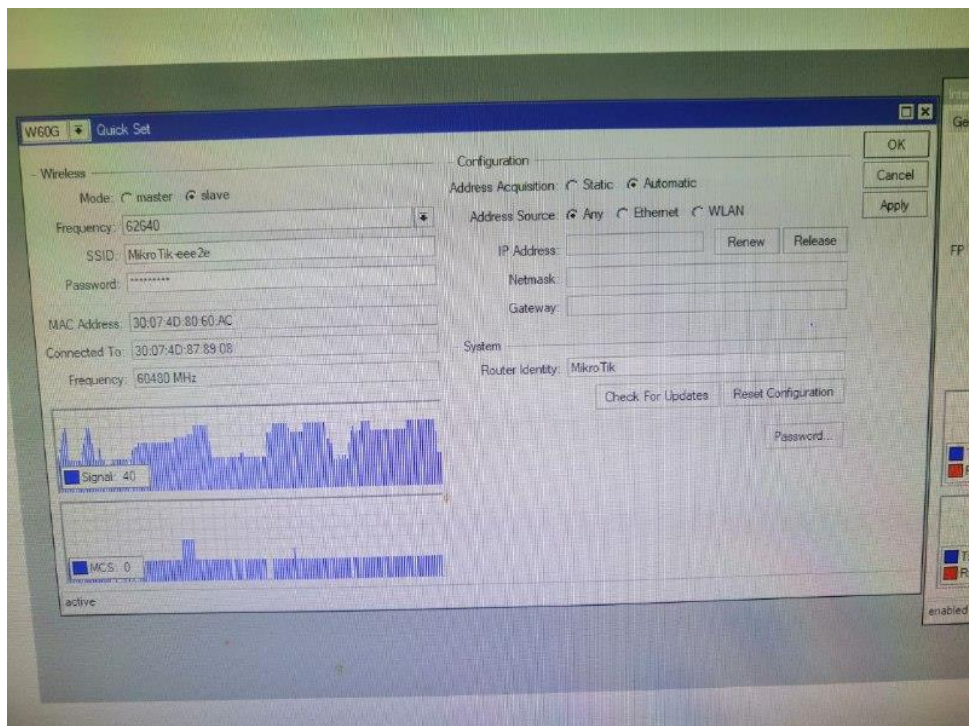


Рисунок 4.3 - Результати з програмного забезпечення WinBox. Рівень сигналу та глибина модуляції

На рисунку можна побачити дуже не стабільний рівень сигналу з максимальними просадками до 40%. Глибина модуляції була від 4 до 0, максимальний рівень 7.

На рисунку 4.4 наведені результати швидкості прийому пакетів.

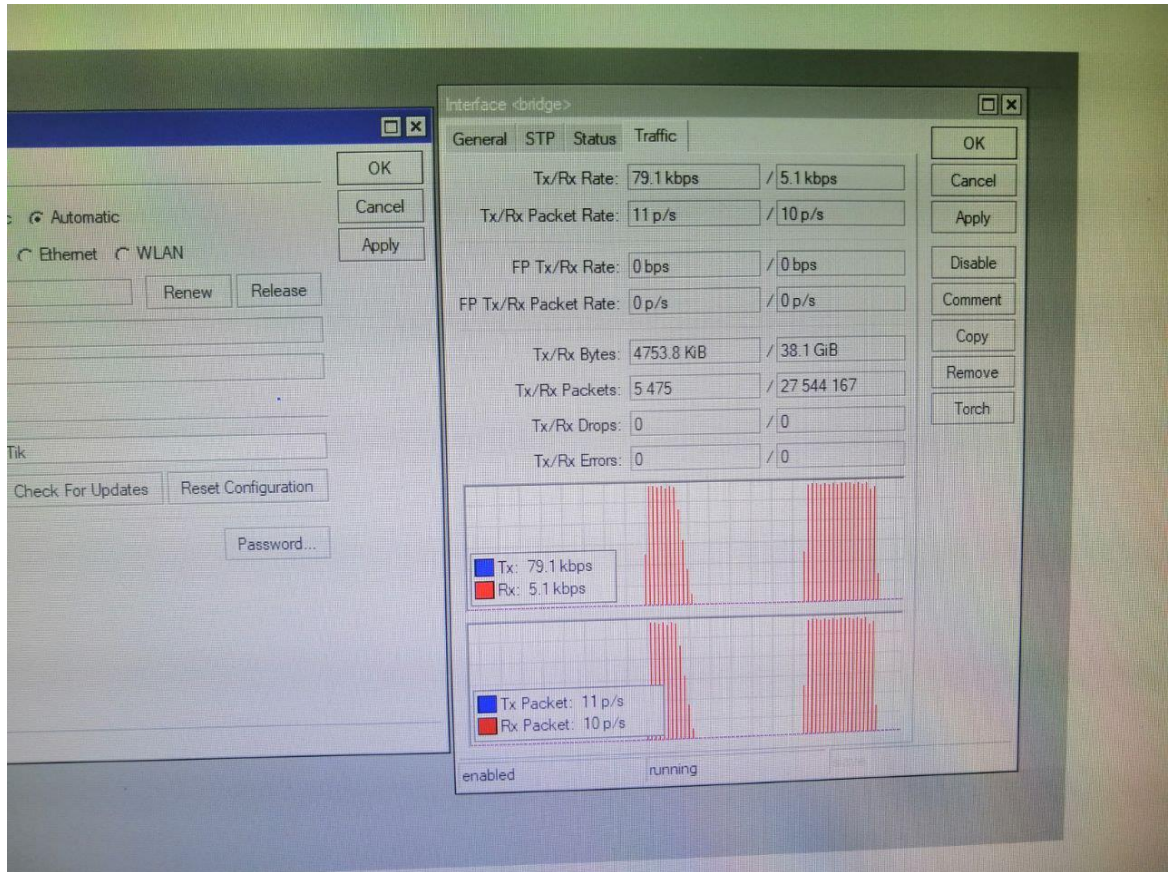


Рисунок 4.4 – Результати швидкості прийому пакетів

При рівні сигналу 40% швидкість прийому падала до 5.1kbps , при рівні сигналу 60% и вище швидкість досягає результатів 950 mbps.

Для генерації трафіку у програмі WinBox ми розробили програмний код.

```
/tool traffic-generator packet-templateAdd ip-dst=192.168.1.1 ip-gateway=192.168.1.2 ip-src=192.168.1.10 name=test1 udp-dst-port=100-300/tool traffic-generator streamAdd mbps=1000 name=stream1 packet-size=1500 tx-template=test1
```

Старт генерації;

```
/tool traffic-generator start
```

## ВИСНОВКИ

Підбиваючи підсумки роботи можна сказати, що поставлене завдання було виконано в повному обсязі.

Актуальність теми для України і для світу в цілому зрозуміла, так як потрібно переходити на 5 покоління зв'язку. А в нашому регіоні експерименти розповсюдження радіохвиль не проводилися. В подальшому планується провести експеримент моніторингу в продовж декількох днів

Нами була розглянута величина ослаблення радіосигналу в каналі зв'язку, викликаного впливом кисню та водяної пари.

Складено двомірну модель діаграми спрямованості. Так як у різних антен скоріш усього будуть різні результати це важливо для точності експерименту

Розроблено код програми для створення трафіку. Це було потрібно для генерації високоскоростної передачі даних, так як ми не мали доступу до інтернету в 1ГГб

Проведено експеримент та представлені результати поширення радіохвиль ММ діапазону поза приміщенням у ясну погоду.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Paul Tattelman, Kevin P. Larson Effects of Rain Attenuation on Satellite EHF Communications in the United States \ AFGL-TR-89-0012N Environmental Research Papers, NO. 1017 Atmospheric sciences division project 6670 Air force geophysics laboratory hanscom AFB, MA 01731, 1989, 179 pp.
2. Crane, R. K., Electromagnetic Wave Propagation Through Rain, Wiley Interscience, New York, 1996.
3. International Telecommunications Union, Radiocommunications Sector. Recommendation 618-9: Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Geneva. 2007. pp. 23.
4. ITU-R: Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling, Recommendation P.837-4. ITU-R Recommendations, P Series, International Telecommunications Union, Geneva, 2003.
5. Boncho G. Bonev, Kliment N. Angelov and Emil S. Altimirski Study on Radio Link Availability in Millimeter Wave Range // World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:5 2011, p.626-629.
6. Ivanov V. K., Leonidov V. I., Maleshenko Yu.I., Pavlikov V. V., Ruzhentsev N. V., Tsopa A. I., Zarudniy A. A. The project of joint investigations of mm waves propagations for ukrainian advanced 5G communication lines // Proc. of Int. Kharkov Symposium - Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), June 21-24, Kharkov, Ukrain, 2016, 4pp. ISBN:978-1-5090-2266-3; IEEE Catalog Number:CFP16780-CDR
7. N.V. Ruzhentsev "Compact 3mm wave band transceivers for technological radars and radiotelephone communication systems", Turkish Journal of Physics, vol.20, N4, 1996, pp.356-358.
8. V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, A. D. Sobkolov, A. I. Tsopa and D. S. Sal'nikov, "Millimeter-range radiometric system for perspective problems of meteorology and

- telecommunication," 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kiev, 2017, pp. 46-51. doi: 10.1109/ICATT.2017.7972583
10. Ruzhentsev N.V. and Churilov V.P. Terrain radiation - measurement investigation at 3-mm wave band //International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996,v.17, N 2, p. 433-449.
11. N. V. Ruzhentsev Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band // Radio Science, v. 38, N 3, 2003, 8043, pp.Mar 8-1 – 8-7, doi:10.1029/2002RS002668
12. ITU-R: Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling, Recommendation P.837-5. ITU-R Recommendations, P Series, International Telecommunications Union, Geneva, 2007
13. H.J. Liebe, "MPM – an atmospheric millimeter waves propagation model," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, vol.10, no 6, pp. 631-650.
14. Luis Emiliani<sup>1</sup>, Lorenzo Luini Evaluation of models for the conversion of T-min rainfall distributions to an equivalent one-minutedistributionto be used in Colombia \\ Rev. Fac. Ing. Univ.Antioquia N 56, pp. 99-119, Diciembre, 2010
15. Talukdar R, Saikia M. Evolution and Innovation in 5G Cellular Communication System and Beyond: A Study [J]. Computer Science, 2014.
16. El Kashlan M, Duong T Q, Chen H H. Millimeter-wave communications for 5G: fundamentals: Part I [Guest Editorial] [J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(9):52-54.
17. El Kashlan M, Duong T Q, Chen H H. Millimeter-wave communications for 5G – Part 2: applications [Guest Editorial] [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1):166-167.
18. Boccardi F, Heath R W, Lozano A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 52(2):74-80.
19. Tsopa O.I. Prediction model of energy security for the systems of subscriber radio access with branched street and corridor communications channels / A. A. Strel'nitskiy, A. E. Strel'nitskiy, O. I. Tsopa and V. M. Shokalo // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc., 2011. – Vol. 54. – No. 2, – pp. 61-67.

20. Tai Huang. Feasibility Study of IEEE 802.11ad for Vehicle-to-X Communication. Chalmers University of Technology, 2015.
21. Sanjib Sur, Vignesh Venkateswaran, Xinyu Zhang, and Parmesh Ramanathan. 60 GHz Indoor Networking Through Flexible Beams: A Link-Level Pro\_ ling. SIGMETRICS Perform. Eval. Rev., 43(1):71{84, June 2015.
22. Nitsche T., Cordeiro C., Flores A. B., Knightly E. W., Perahia E. and Widmer J. C. IEEE 802.11ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi. // IEEE Communications Magazine. – 2014. – vol. 52, № 12, – pp. 132–141.
23. Yang N., Wang L., Geraci G., Elkashlan M., Yuan J. and Renzo M. D. Safeguarding 5G wireless communication networks using physical layer security. // IEEE Communications Magazine, – 2015. – vol. 53, №4. – pp. 20–27.
  24. Steinmetzer D., Chen J., Classen J., Knightly E., Hollick M. Eavesdropping with Periscopes: Experimental Security Analysis of Highly Directional Millimeter Waves // Proceedings of the IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). – 2015, September 2015, Florence.