

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалавр)

Аналіз впливу дощу на дальність мікрохвильового зв'язку на частоті 92-95 ГГц
(тема)

Виконав:
студент IV курсу, групи ТРРТу-21-1
Базокий І.М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Освітня програма Інформаційних радіотехнологій
(повна назва освітньої програми)

Керівник доктор філософії Мерзлікін А.О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри _____
(підпис)

Зрудний О.А.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектроні пристрої, системи та комплекси
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Базоокому Івану Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Радіолокаційна система з фазованою антенною решіткою

затверджена наказом університету від 27.05.2024 р. № 498Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

літературні джерела та електронні ресурси за темою кваліфікаційної роботи

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

перелічити назви всіх розділів роботи від вступу до додатків (див. зміст)

Вступ. 1 ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ 2 ОЦІНКА
ПРОДУКТИВНОСТІ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО (ММ) ДІАПАЗОНУ 3.
РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

Комп'ютерна презентація

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	PhD Мерзлікін А.О.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні	06.05.24- 15.05.2024	вик.
2	Визначення параметрів ліній зв'язку	16.05.2024-20.05.2024	вик.
3	Модель погонного ослаблення в дощі, що	20.05.2024-23.05.2024	вик.
4	Висновки	24.05.2024-30.05.2024	вик.
5	Оформлення пояснювальної записки	01.06.2024-09.06.2024	вик.
6	Представлення роботи на кафедрі	10.06.2024	вик.

Дата видачі завдання 06 травня 2024 р.

Студент _____ (підпис) Базоокій І.М. (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ (підпис) PhD Мерзлікін А.О. (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи магістра містить 53 сторінки тексту, 10 рисунків, 11 джерел посилання, 2 додатки.

ДІАПАЗОН. МІЛІМЕТРИ. ОПАДИ. ЗАГАСАННЯ.

Предметом дослідження є розповсюдження радіохвиль.

Мета роботи – розрахувати вплив опадів на ММ ДХ.

У наслідок виконаної роботи було розраховано на основі експериментальних даних вплив опадів на ММ ДХ за трьох місячний період весни 2024 року

Результати дослідження можуть бути використані для внесення показників в річний довідник опадів.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's thesis contains 53 hundred pages of text, 10 figures, 11 references, 2 appendices.

DIAPASON. MILLIMETRES. PRECIPITATION. ATTENUATION.

The subject of research is radio wave propagation.

The aim of the work is to calculate the effect of precipitation on MM DX.

As a result of the work performed, the effect of precipitation on the MM DX for a three-month period in the spring of 2024 was calculated on the basis of experimental data

The results of the study can be used to include indicators in the annual precipitation guide.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ..	6
ВСТУП.....	7
1 ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ	8
1.1 Бездротовий доступ до Інтернету.....	8
1.2 Прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні Error! Bookmark not defined.	12
1.3 Діаграми спрямованості в міліметровому діапазоні	16
1.4 Огляд впливу клімату на поширення і загасання радіохвиль міліметрового діапазону	19
2 ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО (ММ) ДІАПАЗОНУ	23
2.1 Визначення параметрів ліній зв'язку.....	23
2.2 Архітектури радіопередавачів та радіоприймачів у міліметровому діапазоні	Error! Bookmark not defined. 29
2.3 Модель погонного ослаблення в дощі, що використовується в методах прогнозування.....	33
2.4 Рекомендована оцінка частотних діапазонів 5G.....	34
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	38
3.1 Проведення дослідження інтенсивності дощу у весняні місяці	38
3.2 Розрахунок погонного ослаблення.....	42
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	48
Додаток А – КОПІЇ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	50
Додаток Б – ВІДОМОСТІ АТЕСТАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ	58

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ

IoT – internet of things;

ММ – міліметри;

ДХ – діапазон хвиль;

LTE - Long-Term Evolution;

МІМО – Multiple Input Multiple Output;

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers;

ВСТУП

За останні роки спостерігається стрімке розвиток бездротових мереж, особливо у контексті мобільного зв'язку та інтернету речей (IoT). Швидкість передачі даних у таких мережах є одним із ключових показників їхньої ефективності. Частотний діапазон 92-95 ГГц відомий своєю високою пропускнуою здатністю, що робить його перспективним для використання у майбутніх мережах п'ятого покоління (5G) та інших технологіях. Проте атмосферні умови можуть значно впливати на якість зв'язку в цьому діапазоні, особливо у випадку дощу, туману та високої вологості повітря. Тому вивчення впливу атмосферних умов на мікрохвильовий зв'язок на частоті 92-95 ГГц є актуальною та важливою задачею, щоб розробляти ефективні алгоритми та технології для майбутніх бездротових мереж.

Метою дослідження є аналіз впливу атмосферних умов на дальність мікрохвильового зв'язку на частоті 92-95 ГГц та розробка методів для покращення стійкості зв'язку в умовах несприятливого клімату. Основні завдання дослідження включають:

Проведення огляду літератури щодо використання мікрохвильового діапазону у бездротових мережах та впливу атмосферних умов на мікрохвильовий зв'язок.

Моделювання атмосферних умов та проведення експериментів з мікрохвильовим зв'язком на частоті 92-95 ГГц в умовах дощу, туману та високої вологості повітря.

Аналіз результатів експериментів та розробка рекомендацій щодо оптимізації параметрів мікрохвильового зв'язку для забезпечення стійкості у різних атмосферних умовах.

Об'єктом дослідження є мікрохвильовий зв'язок на частоті 92-95 ГГц у різних атмосферних умовах. Предметом дослідження є вплив атмосферних умов, зокрема дощу, туману та вологості повітря, на дальність та якість мікрохвильового зв'язку.

1 ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

1.1 Бездротовий доступ до Інтернету

Міліметровий діапазон (ММ) визначається частотами від 30 до 300 ГГц і є одним із ключових напрямків розвитку технологій 5G. Цей діапазон відомий своєю високою пропускнуою здатністю і здатністю передавати великі обсяги даних на великі відстані. Використання ММ у 5G може забезпечити велику швидкість передачі даних, низьку затримку та покращену ємність мережі. Однак, цей діапазон також має свої виклики, такі як обмежену проникність сигналу через перешкоди та високу чутливість до погодних умов.

За останні роки індустрія зв'язку вклала значні зусилля у впровадження ММ ДХ у технології 5G. Однією з основних переваг цього діапазону є його велика ширина смуги, що дозволяє передавати великі обсяги даних з високою швидкістю. Крім того, міліметрові хвилі можуть бути ефективно використані для міських мереж, де велика кількість користувачів потребує великої пропускнуої здатності.[1]

Однак використання ММ також вносить свої виклики. Один з них - обмежена проникність сигналу через перешкоди, такі як стіни будівель або дерева. Це може призвести до погіршення покриття мережі і потреби в більшій кількості встановлених базових станцій для забезпечення надійного зв'язку. Крім того, міліметрові хвилі більш чутливі до атмосферних умов, таких як дощ або сніг, що може також вплинути на якість зв'язку.

Незважаючи на ці виклики, індустрія зв'язку впевнена у перспективах використання міліметрового діапазону у технологіях 5G. Зараз ведуться активні дослідження і розробки нових технологій, які дозволять оптимізувати використання ММ і забезпечити надійний зв'язок в умовах міського середовища. Крім того, впровадження міліметрового діапазону у технології 5G може відкрити нові можливості для розвитку інтернету речей (IoT), високошвидкісного Інтернету та інших сучасних технологій зв'язку.

5G революціонізує побудову мереж у всьому світі. Зовсім скоро всій світовій спільноті доведеться пристосуватися до нового способу технологічного життя в різних галузях, на ринках і в регіонах. Цей новий технологічний стандарт обіцяє набагато більше, ніж лише подальший розвиток наявних технологій мобільного зв'язку. Окрім постійної уваги до мережевих технологій у рамках 5G IoT, першочергове значення матиме оптимальне задоволення зростаючих потреб мережевого суспільства.

Всебічна цифровізація суспільства і економіки торкнеться практично всіх сфер життя і діяльності людини. Досі основною метою було розширення інфраструктурних умов звичайних мереж у всіх напрямках, щоб забезпечити їхню більшу доступність для мобільних пристроїв. У найближчі роки, крім продовження роботи в рамках 5G IoT, основна увага буде приділятися задоволенню зростаючих потреб мережевого суспільства.

Завдяки стандарту стільникового зв'язку "3G" стало можливим комфортне використання трафіку з мобільних пристроїв, що зробило його основним катализатором для виробництва смартфонів нового покоління. Пізніше було створено четверте покоління стандартів мобільних мереж, яке представлено "LTE", що значно збільшило швидкість передачі даних.[2]

На сьогодні LTE є найпопулярнішою і найчастіше використовуваною мережею. Швидкість до 100 мегабіт на секунду стала реальністю в багатьох сферах економіки та суспільства. Зараз можна навіть розширити смугу пропускання LTE, щоб досягти швидкості завантаження до 4000 мегабіт на секунду.

Однак у майбутньому LTE буде недостатнім, щоб відповідати стандартам і очікуванням нових технологій. LTE був розроблений і оптимізований для використання на смартфонах, тоді як 5G стане мобільним стандартом для всіх підключених пристроїв.

5G IoT піднімає планку у всіх аспектах. Пропускна здатність нової мережі сягатиме 20 гігабіт на секунду, що значно зменшить час відгуку. З 5G також можна буде передавати дані в реальному часі, що означає, що 100 мільярдів

мобільних пристроїв по всьому світу будуть доступні одночасно. Іншими словами, щільність підключення складатиме приблизно один мільйон пристроїв на квадратний кілометр. Крім того, нова технологія покращить якість зв'язку під час руху, що означає стабільний зв'язок при швидкості до 500 кілометрів на годину, що принесе величезні переваги, особливо для подорожуючих користувачів мережі. На рисунку 1.1 показана мережева модель середовища IoT з підтримкою 5G.

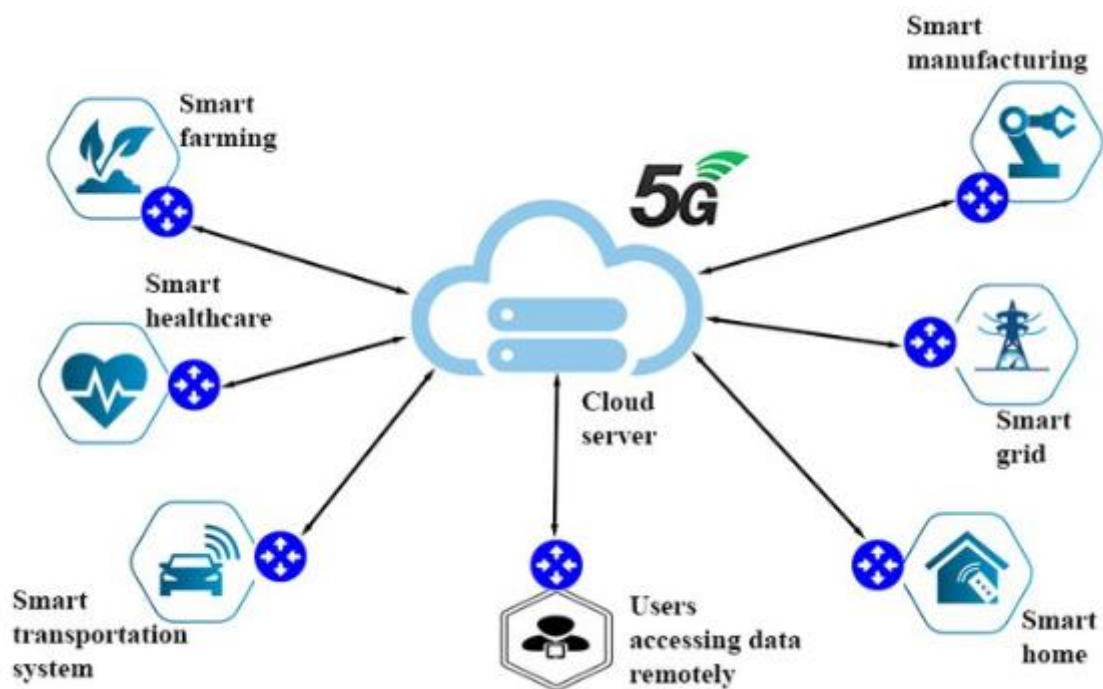


Рисунок 1.1 - Мережева модель середовища IoT з підтримкою 5G

Незалежно від смартфонів, збільшення обсягів даних неминуче в інших сферах застосування. З цих та інших причин 5G IoT стане новою ключовою технологією підключення.

Отже, міліметровий діапазон відіграє важливу роль у розвитку технологій 5G. Хоча він має свої виклики, його висока пропускну здатність та здатність передавати великі обсяги даних роблять його привабливим для використання у майбутніх мережах 5G. Зараз ведуться активні розробки для оптимізації використання ммХВЧ і забезпечення надійного зв'язку в умовах міського середовища, що дасть змогу використовувати його на повну потужність у майбутніх мережах 5G.

Це особливо важливо для додатків, які вимагають великої пропускної здатності, наприклад, відеострімінгу у високій якості (4K, 8K) або віртуальної реальності. Використання ММ дозволяє створювати мережі з надзвичайною швидкістю передачі даних, що покращує якість користувацького досвіду та розширює можливості мобільних сервісів.[3]

Однак використання ММ також вносить виклики у розвиток технологій 5G. Один з основних викликів - обмежена проникність сигналу через перешкоди. Сигнал у цьому діапазоні може бути блокований будь-якими преградами, включаючи стіни будівель або навіть дощ або сніг. Це може призвести до погіршення якості зв'язку в місцях з великою концентрацією перешкод, таких як великі міста або в густонаселених районах.

Ще однією проблемою є висока чутливість ММ до погодних умов, таких як дощ або туман. Ці явища можуть вплинути на розповсюдження сигналу, зменшуючи дальність передачі даних та збільшуючи затримку. Це може бути особливо проблематичним в регіонах з вологим кліматом або під час сильних погодних умов.

Ще однією проблемою є високі вимоги до антенних систем. Для ефективного використання ММ необхідно використовувати високоякісні антенні системи з високою направленістю та точністю встановлення. Це може підвищити вартість впровадження технологій 5G у міліметровому діапазоні.

Незважаючи на ці виклики, використання ММ у технологіях 5G має великий потенціал для покращення якості зв'язку та розширення можливостей мобільних сервісів. З правильним підходом до вирішення викликів, пов'язаних з цим діапазоном, ММ може стати ключовим компонентом майбутніх мобільних мереж і значно покращити спосіб, яким ми взаємодіємо з мобільними технологіями.

Частотний діапазон 90-92 ГГц використовується у бездротових комунікаційних системах для проведення високошвидкісних передач даних, особливо у високочастотних мікрохвильових системах. Такі частоти використовуються у важливих додатках, наприклад, у військовому зв'язку,

медичних технологіях (наприклад, для безпроводної передачі медичних зображень), наукових дослідженнях та в інших сферах, де потрібна велика пропускна спроможність та висока швидкість передачі даних. Також цей діапазон може застосовуватися у радіолокаційних системах та безпроводних мережах місцевого зв'язку.[4]

Такий високочастотний діапазон (90-92 ГГц) має кілька переваг і особливостей:

Велика пропускна здатність: Частоти 90-92 ГГц дозволяють передавати великі обсяги даних за короткий час, що робить їх ідеальними для високошвидкісного передавання відео, аудіо та інших великих обсягів інформації.

Компактність обладнання: Високочастотні системи у діапазоні 90-92 ГГц можуть бути дуже компактними, що дозволяє їх використання в мобільних та портативних пристроях.

Мала інтерференція: Частоти в діапазоні 90-92 ГГц використовуються лише в обмежених діапазонах, що зменшує ймовірність інтерференції від інших пристроїв.

Висока точність передачі: Використання високочастотного діапазону дозволяє досягти високої точності передачі даних, що важливо для радіолокаційних та медичних систем.

Застосування частотного діапазону 90-92 ГГц включає в себе бездротові мережі місцевого зв'язку (WiGig), системи високошвидкісного інтернету, радіолокаційні системи, медичні технології та багато іншого.

1.2 Прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні

Прольоти точка-точка (Point-to-Point, PtP) у міліметровому діапазоні є однією з ключових технологій, що використовується для безпроводового зв'язку на великі відстані з високою пропускною здатністю. Ця технологія відіграє важливу роль у розвитку мобільних мереж 5G та високошвидкісних бездротових зв'язків.

Прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні відрізняються від інших бездротових технологій, таких як Wi-Fi або Bluetooth, більшою пропускнуою здатністю та більшою дальністю зв'язку. Це досягається завдяки використанню великої ширини смуги та високочастотних хвиль у міліметровому діапазоні.

Однією з основних переваг прольотів точка-точка у міліметровому діапазоні є висока швидкість передачі даних. Зі вдяк великій ширині смуги ці технології можуть передавати дані з великою швидкістю, що робить їх ідеальними для високошвидкісних мереж та додатків, які вимагають великої пропускнуої здатності, наприклад, відео стрімінгу в ультра-високій роздільній здатності. На рисунку 1.2 приведена схема прольоту точка-точка у міліметровому діапазоні

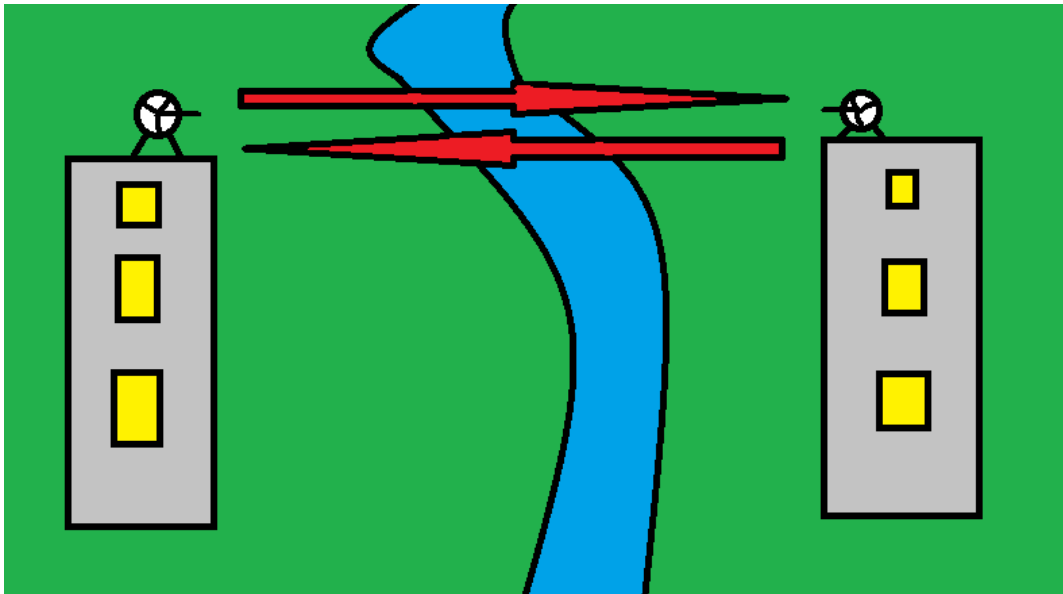


Рисунок 1.2 - Прольот точка-точка у міліметровому діапазоні

Крім того, прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні можуть працювати на великі відстані. Це робить їх ідеальними для використання в ситуаціях, коли необхідно забезпечити бездротовий зв'язок на великі відстані, наприклад, між будівлями або віддаленими об'єктами.[5]

Однак, варто відзначити, що прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні мають свої обмеження і виклики. Одним з основних викликів є обмежена проникність сигналу через перешкоди. Сигнал у цьому діапазоні може бути блокований будь-якими перешкодами, такими як стіни будівель або рослинність, що може вплинути на якість зв'язку.

Прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні вимагають високоякісних антенних систем з високою направленістю та точністю встановлення. Це може підвищити вартість впровадження технологій та зробити їх менш доступними для рядових користувачів.

Усі ці виклики та обмеження варто враховувати при плануванні та впровадженні прольотів точка-точка у міліметровому діапазоні. З правильним підходом, вони можуть стати важливим компонентом мобільних мереж майбутнього, що забезпечать високу швидкість передачі даних та покращену якість зв'язку для користувачів у всьому світі.

Однією з ключових переваг прольотів точка-точка у міліметровому діапазоні є їх висока резервна можливість. Завдяки використанню великої кількості доступних частот та адаптивному управлінню каналами, ці технології можуть ефективно уникати перешкод та забезпечувати стабільний зв'язок навіть у умовах високої концентрації користувачів або електромагнітних перешкод.

Крім того, прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні можуть бути використані для побудови високонадійних мереж зв'язку, які можуть працювати у режимі реального часу. Це особливо важливо для таких застосувань, як мережі масштабного інтернету речей (IoT), автономні автомобілі та медичні системи, де низька затримка та висока надійність є критичними вимогами.

Прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні також можуть бути використані для розширення доступу до бездротового інтернету в віддалених або важкодоступних місцях. Це може включати в себе підключення сільських районів, гірських районів або місць, де проведення провідного зв'язку є неможливим або дорогим.

Необхідно також відзначити, що прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні мають потенціал для використання в міських середовищах, де велика концентрація користувачів може призводити до перевантаження традиційних мереж зв'язку. Вони можуть бути використані для підвищення пропускну здатності та покращення якості зв'язку для користувачів у таких областях.

Загалом, прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні мають великий

потенціал для використання у мобільних та бездротових мережах майбутнього. Їх висока швидкість передачі даних, велика резервна можливість та можливість побудови високонадійних мереж роблять їх привабливими для операторів зв'язку та виробників обладнання. Однак для успішного впровадження цих технологій необхідно вирішити виклики, пов'язані з обмеженою проникністю сигналу та вимогами до антенних систем.

Для успішного впровадження прольотів точка-точка у міліметровому діапазоні важливо також вирішити питання відповідності стандартам безпеки та забезпечення конфіденційності даних. У зв'язку з тим, що міліметрові хвилі можуть бути вражені погодними умовами та іншими електромагнітними перешкодами, важливо розробляти адаптивні алгоритми та механізми, які дозволяють забезпечити стабільний зв'язок навіть в умовах зміни зовнішніх умов.

Одним із способів вирішення цих питань є використання технологій масивних антенних систем (МАС), які дозволяють забезпечити високу направленість сигналу та знизити вплив перешкод. Такі системи можуть бути особливо ефективними в міських середовищах, де велика кількість будівель та інших перешкод може ускладнити передачу сигналу.

Додатково, для підвищення надійності та стабільності зв'язку в міліметровому діапазоні можна використовувати технології багатопроменевої передачі (МІМО), які дозволяють використовувати одну й ту ж саму частотну смугу для передачі даних на різних антенних променях. Це дозволяє підвищити ефективність використання частотного ресурсу та забезпечити більш стабільний зв'язок у умовах зміни відстані та напрямку між антенами.

Наприклад, використання прольотів точка-точка у міліметровому діапазоні може бути дуже ефективним для забезпечення бездротового зв'язку у міських районах, де велика кількість користувачів та перешкод можуть ускладнити роботу традиційних бездротових мереж. Такі технології можуть допомогти покращити доступність та якість бездротового зв'язку для користувачів у таких районах.

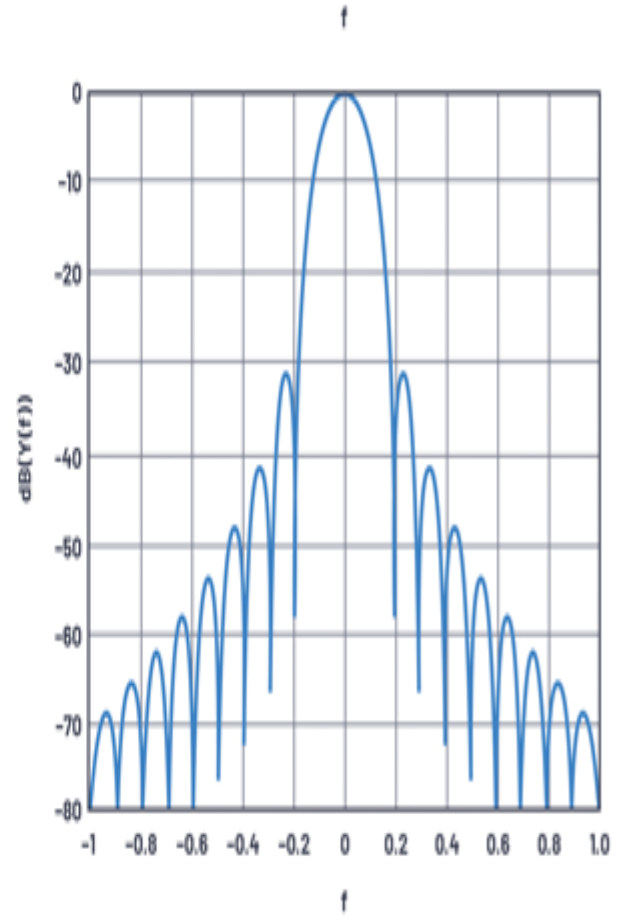
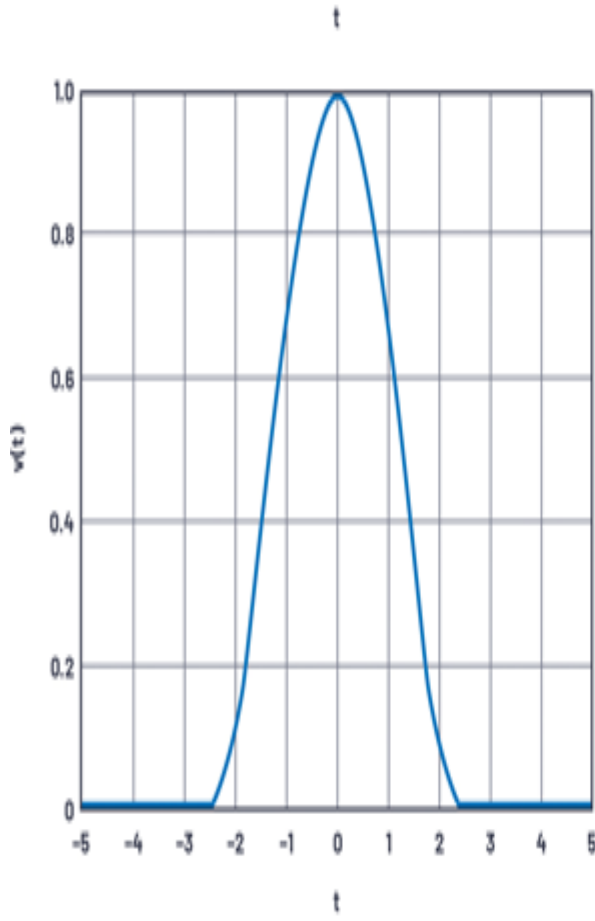
У цілому, прольоти точка-точка у міліметровому діапазоні мають великий потенціал для розвитку мобільних та бездротових мереж майбутнього. Їх

висока швидкість передачі даних, велика резервна можливість та можливість побудови високонадійних мереж роблять їх привабливими для використання у різних сферах, від мобільних мереж до міських середовищ. Однак для успішного впровадження цих технологій варто вирішити виклики, пов'язані з обмеженою проникністю сигналу та вимогами до антенних систем, а також забезпечити відповідність стандартам безпеки та конфіденційності даних.

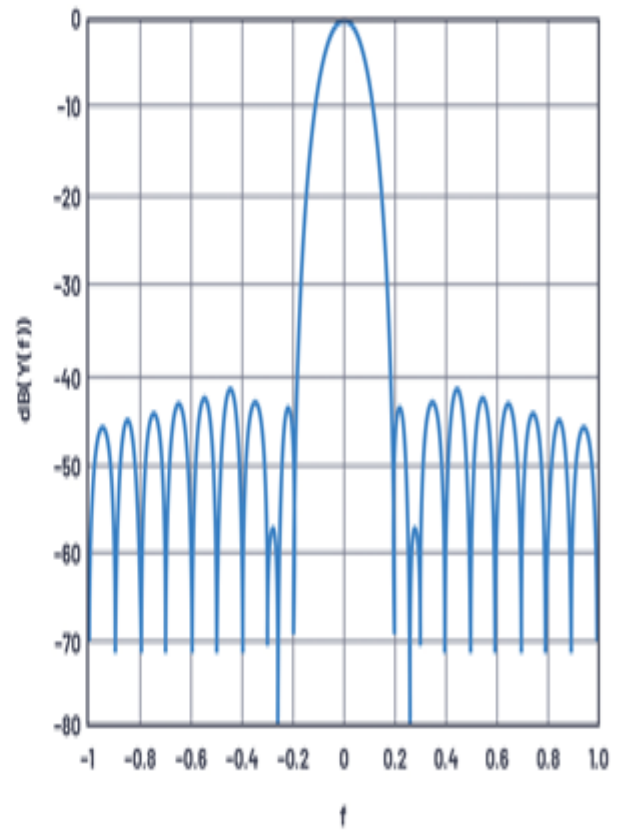
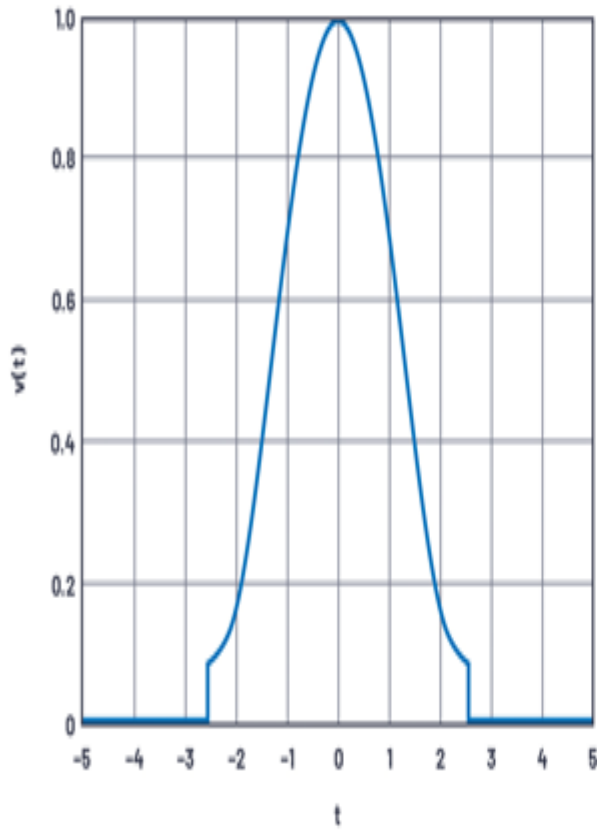
1.3 Діаграми спрямованості в міліметровому діапазоні

Діаграми спрямованості антен (рисунок 1.3) у міліметровому діапазоні є ключовим елементом для досягнення високої ефективності зв'язку. У міліметровому діапазоні хвиль довжина хвилі дуже коротка, що дозволяє створювати антени компактного розміру з високою направленістю.

Одним з типових варіантів антен у міліметровому діапазоні є антена з фазованою решіткою. Ця антена складається з масиву елементів, кожен з яких може бути включений або виключений залежно від фази сигналу. Така антена дозволяє створювати діаграму спрямованості з високою направленістю, що дозволяє спрямовувати сигнал у визначений напрямок.[6]



a)



б)

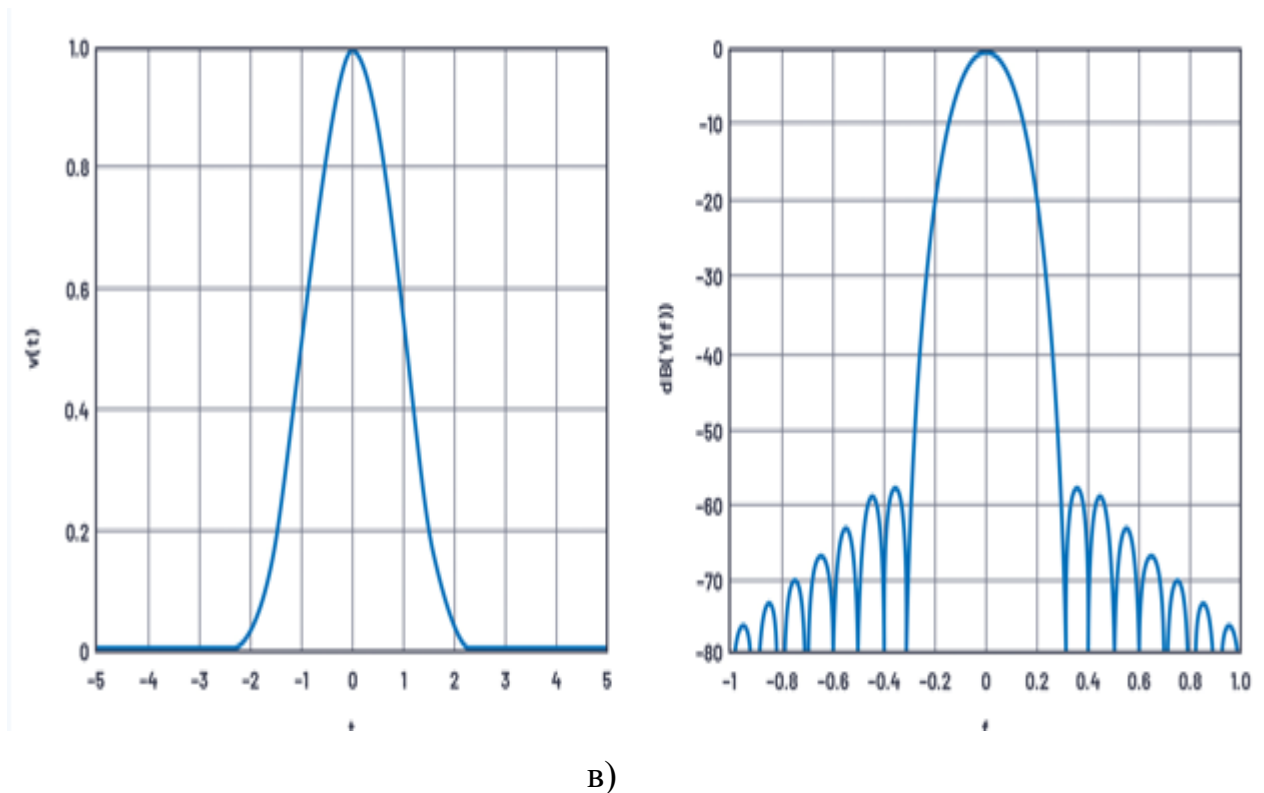


Рисунок 1.3 – Діаграми спрямованості антени ФАР

Іншим поширеним варіантом є антени з розгалуженою подачею, такі як антени з лінзами, які використовуються для концентрації сигналу у вузькому куті. Ці антени мають здатність фокусувати сигнал у вузькому куті, що дозволяє забезпечити високу направленість сигналу у вибраному напрямку.

Також важливим елементом діаграм спрямованості у міліметровому діапазоні є антени з апертурою, такі як апертурні антени. Ці антени використовують велику апертуру для збільшення ефективної площі антени та забезпечення високої направленості.

Усі ці типи антен можуть бути використані для створення діаграм спрямованості з високою направленістю в міліметровому діапазоні. Це дозволяє забезпечити ефективний зв'язок на великі відстані та ускладнених умовах, таких як міські середовища або вузькі зони покриття.[7]

Для досягнення високої ефективності зв'язку у міліметровому діапазоні частот важливо правильно проектувати та використовувати антени з відповідними діаграмами спрямованості. Наприклад, антени з фазовою решіткою можуть бути використані для створення напрямленої діаграми з

високою направленістю, що дозволяє забезпечити точну передачу сигналу у визначений напрямок.

Діаграми спрямованості антен у міліметровому діапазоні можуть мати різні форми, включаючи узори з піковою направленістю або широкі узори з більшою зоною покриття. Вибір конкретної форми діаграми залежить від конкретних вимог до зв'язку, таких як відстань передачі, кут покриття та потреби в антенних системах МІМО.

Для забезпечення ефективного використання діаграм спрямованості у міліметровому діапазоні також важливо враховувати вплив атмосферних умов та погодних явищ на поширення сигналу. Високочастотні сигнали у міліметровому діапазоні можуть бути сильно впливати дощем, туманом або іншими атмосферними явищами, що може призводити до зменшення дальності передачі та погіршення якості зв'язку. Одним із способів боротьби з цими впливами є використання адаптивних алгоритмів управління антенними системами, які дозволяють змінювати діаграму спрямованості відповідно до змін у атмосферних умовах.

Усі ці аспекти важливі для успішного впровадження та ефективного використання антен у міліметровому діапазоні для забезпечення високошвидкісного та надійного бездротового зв'язку. З правильним плануванням та налаштуванням антенних систем можна досягти високої продуктивності та якості зв'язку у міліметровому діапазоні, що дозволить ефективно використовувати цей діапазон для мобільних та бездротових мереж майбутнього.

1.4 Огляд впливу клімату на поширення і загасання радіохвиль міліметрового діапазону

Вплив клімату (рисунок 1.4) на поширення і загасання радіохвиль міліметрового діапазону (ММ ДХ) є важливою темою для розуміння та вдосконалення бездротових комунікаційних систем у цьому діапазоні.

Кліматичні умови, такі як дощ, туман, сніг, вологість повітря та температура, можуть значно впливати на поширення радіохвиль ММ Д через атмосферу. Розглянемо основні аспекти цього впливу:[8]

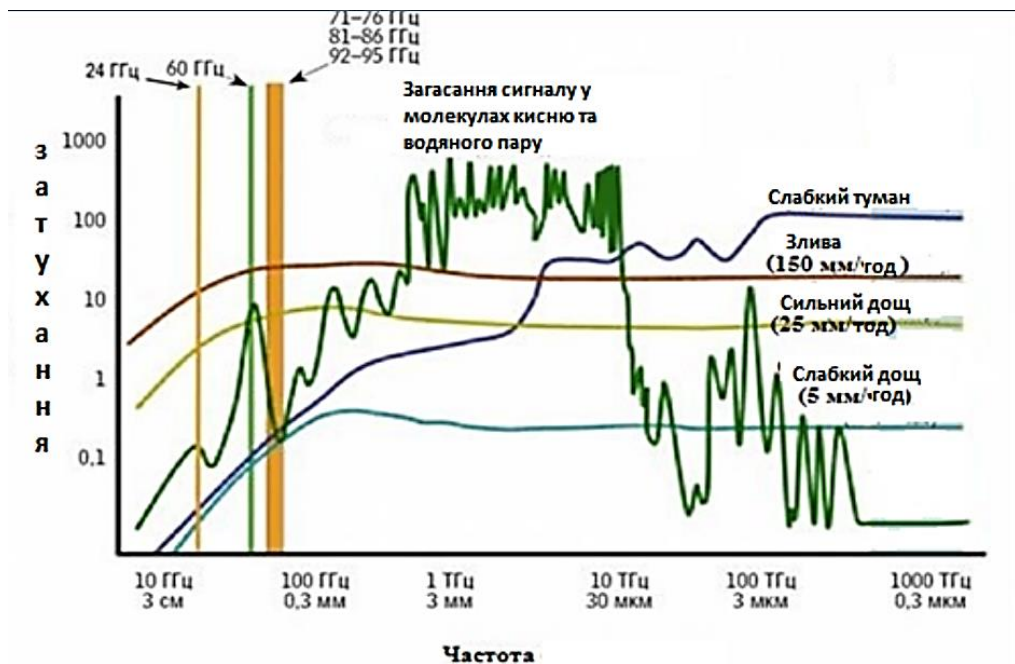


Рисунок 1.4 – Загасання сигналу в навколишньому середовищі

Дощ та вологість повітря: Вологість повітря має велике значення для радіохвиль у міліметровому діапазоні. Водяна пара у повітрі може поглинати радіохвилі, зменшуючи їхню дальність поширення. Це особливо помітно при дощі, коли кількість водяної пари у повітрі збільшується, що може призвести до значного загасання сигналу.

Туман: Туман може впливати на поширення радіохвиль ММ Д, особливо в районах з високою вологістю повітря. Туман може викликати розсіювання радіохвиль, що призводить до втрати сигналу та зниження дальності поширення.

Сніг: Сніг може впливати на поширення радіохвиль, хоча в меншій мірі, ніж дощ або туман. Сніг може відбивати, розсіювати або поглинати радіохвилі, що може призвести до зниження якості зв'язку.

Температура: Температура може впливати на поширення радіохвиль ММ Д через вплив на вологість повітря та її властивості. При високих температурах

може збільшуватися кількість водяної пари у повітрі, що може призводити до збільшення загасання радіохвиль.

Для ефективного проектування та вдосконалення систем бездротового зв'язку у міліметровому діапазоні важливо враховувати вплив клімату на поширення радіохвиль. Це може включати розробку адаптивних алгоритмів управління, які можуть адаптувати параметри зв'язку до змінних кліматичних умов, а також використання антен з покращеною ефективністю у важких атмосферних умовах.

Дощ та злива можуть суттєво впливати на поширення та загасання радіохвиль у міліметровому діапазоні. Дощ складається з крапель води, які можуть поглинати та розсіювати радіохвилі, що може значно зменшити дальність передачі та якість сигналу. Зливи можуть бути ще більш проблематичними, оскільки вони можуть супроводжуватися сильним вітром та градом, що може спричинити пошкодження антен та інших елементів зв'язку.

Одним із способів боротьби з впливом дощу та зливи на радіохвилі у міліметровому діапазоні є використання адаптивних алгоритмів управління антенними системами. Ці алгоритми можуть дозволити змінювати напрямленість та інші параметри антен в реальному часі для мінімізації впливу дощу та зливи на якість зв'язку. Також можуть використовуватися антени з великою напрямленістю, які зменшують вплив перешкод.[9]

Однак, навіть з використанням цих методів, дощ та зливи можуть продовжувати впливати на якість зв'язку у міліметровому діапазоні. Тому важливо при плануванні мережі зв'язку у цьому діапазоні враховувати можливий вплив погодних умов та розробляти стратегії резервування та відновлення зв'язку у разі пошкоджень або перешкод.

Усі ці аспекти важливо враховувати при плануванні та впровадженні мереж зв'язку у міліметровому діапазоні для забезпечення стабільної та надійної роботи у різних погодних умовах.

Додатково до адаптивних алгоритмів управління антенними системами та використання антен з великою напрямленістю, можуть бути застосовані інші

методи для зменшення впливу дощу та зливи на радіохвилі у міліметровому діапазоні. Наприклад, використання антенних систем з різними поляризаціями може допомогти зменшити втрати сигналу від відбиття та розсіювання від дощових крапель. Також можна використовувати різні шляхи передачі сигналу, щоб уникнути блокування сигналу дощовими хмарами.

Ще одним способом зменшення впливу дощу та зливи на радіохвилі може бути використання множинного введення-виведення (MIMO). Використання багатьох антенних елементів на передавачі та приймачі дозволяє використовувати різні шляхи поширення сигналу, в тому числі обхід дощових хмар. Це може покращити якість зв'язку та забезпечити більшу стійкість до погодних умов.

Однак важливо враховувати, що навіть з використанням цих методів дощ та зливи можуть продовжувати впливати на якість зв'язку у міліметровому діапазоні. Тому важливо розробляти та впроваджувати ефективні стратегії резервування та відновлення зв'язку для забезпечення стійкої роботи мереж у різних погодних умовах.

Для компенсації впливу атмосферних умов на мікрохвильовий сигнал у міліметровому діапазоні можна використовувати різні методи. Наприклад, корекція затримки сигналу дозволяє скорегувати затримку сигналу відповідно до оригіналу. Компенсація втрат сигналу дозволяє відновити втрачену енергію сигналу через атмосферні явища. Використання адаптивних антен дозволяє управляти напрямком збору сигналу, що допомагає уникнути втрат сигналу. Корекція фази та амплітуди сигналу також може бути використана для компенсації змін у фазовій структурі та амплітуді сигналу, спричинених атмосферними умовами. Ці методи можуть бути застосовані окремо або в поєднанні для ефективною компенсації впливу атмосферних умов на мікрохвильовий сигнал у міліметровому діапазоні.

2. ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО (ММ) ДІАПАЗОНУ

2.1 Визначення параметрів ліній зв'язку

Визначення параметрів ліній зв'язку включає наступні кроки:

Довжина лінії зв'язку: Визначення фізичної відстані між передавачем і приймачем.

Частотний діапазон: Встановлення діапазону частот, який використовується для передачі сигналу.

Тип антени: Вибір типу антени (наприклад, розсіювальна, направлена) залежно від вимог до покриття і дальності зв'язку.

Спосіб модуляції: Визначення методу модуляції сигналу для передачі даних (наприклад, QPSK, 16-QAM).

Параметри передавача і приймача: Встановлення потужності передавача, чутливості приймача, рівня шуму і додаткових характеристик обладнання.

Затримки і спотворення: Оцінка затримок сигналу та можливих спотворень у зв'язку зі стінами, перешкодами або іншими чинниками.

Стандарти зв'язку: Вибір стандарту зв'язку (наприклад, IEEE 802.11 для Wi-Fi, 3GPP для мобільного зв'язку).

Система кодування: Вибір кодування для забезпечення надійності передачі даних (наприклад, FEC - перевірка на помилки в каналі).

Вибір типу антени для використання в лінії зв'язку міліметрового діапазону може бути вирішальним для досягнення високої продуктивності і якості зв'язку. Основні типи антен, які можуть бути розглянуті для використання в міліметровому діапазоні, включають:

Параболічні антени: Ці антени використовуються для довгодіючих зв'язків і вимагають точного налаштування. Вони мають високий коефіцієнт підсилення, що дозволяє забезпечити сильний сигнал на великі відстані.

Мікрополоскові антени: Вони компактні та легкі у виготовленні, що робить їх популярними для використання в міліметровому діапазоні. Вони можуть мати високу направленість і ефективно використовувати обмежений простір.

Слот-антени: Ці антени можуть бути використані для високочастотного зв'язку і мають досить широкий діапазон направленості.

Антени типу "лінза": Вони використовуються для підсилення і фокусування сигналу у визначеному напрямку, що робить їх ефективними для міліметрового зв'язку.

Решітчасті антени: Ці антени використовуються для високочастотного зв'язку і можуть мати велику направленість і високий коефіцієнт підсилення.

Модуляція сигналу - це процес зміни параметрів несучої хвилі (амплітуди, частоти або фази) відповідно до змісту передаваної інформації. Цей процес дозволяє передавати дані через канали зв'язку, такі як радіохвильові лінії зв'язку або кабельні мережі. Модуляція може бути аналоговою або цифровою, в залежності від того, як саме змінюються параметри несучої хвилі.

QoS (Quality of Service - якість обслуговування) - це набір технологій і механізмів, що використовуються для забезпечення певного рівня якості обслуговування для мережевих додатків і послуг. QoS дозволяє встановлювати пріоритети для різних видів трафіку, контролювати пропускну здатність мережі і забезпечувати надійність передачі даних.[9]

Існують кілька класів QoS, які визначаються відповідно до потреб конкретного додатку або послуги:

Клас обслуговування за запитом (Best Effort): Цей клас не гарантує жодних певних параметрів обслуговування і використовується для трафіку, який може працювати з непостійною пропускну здатністю.

Клас обслуговування з гарантованою пропускну здатністю (Guaranteed): Цей клас гарантує певний рівень пропускну здатності для передачі даних і використовується для послуг, які вимагають стабільного і надійного з'єднання.

Клас обслуговування з мінімальною пропускнуою здатністю (Minimum): Цей клас гарантує мінімальний рівень пропускнуої здатності і використовується для послуг, які потребують мінімального рівня обслуговування.

Клас обслуговування з підтримкою часових обмежень (Controlled Load): Цей клас гарантує, що мережа буде обробляти трафік з мінімальними затримками і використовується для послуг, які вимагають стабільного часового реагування.

Клас обслуговування з відміткою потоку (Flow-Aware): Цей клас дозволяє задавати правила для обробки конкретних потоків даних у мережі і використовується для послуг, які потребують індивідуальної обробки.

Класи QoS дозволяють мережам забезпечувати різні рівні обслуговування в залежності від вимог конкретних додатків або послуг.

Якщо ви цікавитесь QoS, можливо, вас цікавить більше інформації про конкретні технології або механізми QoS? Я можу розповісти про різні протоколи та методи, які використовуються для забезпечення QoS в мережах.

Класи мережевого QoS визначають рівні обслуговування, які можуть бути надані різним видам трафіку в мережі. Основні класи мережевого QoS включають:

Клас обслуговування Real-Time (RT): Цей клас призначений для реального часу або часочутливих додатків, таких як VoIP (Voice over Internet Protocol) або відеоконференції. Головною метою цього класу є забезпечення мінімальної затримки та високої якості обслуговування.

Клас обслуговування Assured Forwarding (AF): Цей клас надає гарантований рівень обслуговування для трафіку, який вимагає стабільності і низької втрати пакетів. AF може мати кілька рівнів, кожен з яких надає різний рівень гарантованого обслуговування.

Клас обслуговування Expedited Forwarding (EF): Цей клас надає найвищий пріоритет для трафіку, який вимагає мінімальної затримки і гарантованої пропускнуої здатності. EF використовується для додатків, які вимагають великої пріоритетності, наприклад, для голосового трафіку.

Клас обслуговування Best Effort (BE): Це базовий клас, який використовується для трафіку, якому не потрібні гарантії якості обслуговування. Трафік у цьому класі обслуговування передається відповідно до доступної пропускної здатності мережі.[10]

"Якість" в контексті мережевого обслуговування (QoS) визначається рівнем задоволення користувачів певної послуги або додатку в мережі. Вона може включати такі параметри, як мінімальна затримка, максимальна пропускна здатність, низький рівень втрат пакетів та інші. Якість обслуговування є важливою для забезпечення стабільності та ефективності роботи мережі, особливо для реального часу або часочутливих додатків, таких як VoIP або відеоконференції. Для досягнення високої якості обслуговування необхідно використовувати різні технології та механізми, такі як призначення пріоритетів трафіку, контроль пропускної здатності та керування затримками.

"Швидкість" в контексті мережевого обслуговування (QoS) визначається як кількість даних, які можуть бути передані через мережу за одиницю часу. Це може бути виміряно в бітах на секунду (bps), кілобітах на секунду (kbps), мегабітах на секунду (Mbps) або гігабітах на секунду (Gbps). Швидкість є важливим параметром для визначення продуктивності мережі і може бути одним з ключових критеріїв для користувачів, особливо для послуг, які вимагають великої пропускної здатності, наприклад, стрімінг відео чи передача великих файлів. Для забезпечення високої швидкості передачі даних мережі необхідно мати відповідну пропускну здатність та ефективні механізми керування трафіком.

"Готовність" в контексті мережевого обслуговування (QoS) відноситься до можливості мережі або системи бути доступною та функціональною в умовах, коли її потрібно використовувати. Готовність включає в себе такі аспекти, як надійність мережі, швидкість відновлення після виникнення помилок або відмов, та загальна ефективність роботи мережі. Забезпечення готовності мережі вимагає впровадження відповідних технологій та механізмів, таких як дублювання обладнання, резервування мережевих шляхів та розподіл

навантаження. Готовність є важливим аспектом QoS, оскільки вона впливає на здатність мережі виконувати свої завдання в умовах реального використання.

"Надійність" в контексті мережевого обслуговування (QoS) відноситься до здатності мережі або системи до безвідмовної роботи та до відновлення роботи в разі виникнення помилок або відмов. Надійність є важливим аспектом QoS, оскільки вона впливає на доступність послуг та задоволення користувачів.

Для забезпечення надійності мережі використовуються різноманітні технології та методи, такі як резервування маршрутів, механізми переключення на резервний обладнання, дублювання даних та механізми виявлення та відновлення від помилок. Надійність є однією з ключових характеристик, яку мережеві адміністратори стараються підтримувати на високому рівні для забезпечення стабільності та безперебійної роботи мережі.

"Точність" в контексті мережевого обслуговування (QoS) може вказувати на правильність передачі даних без помилок або втрат. В контексті передачі даних це може означати, що дані, які відправляються з одного пристрою на інший через мережу, приходять без змін і в тому самому порядку, в якому вони були відправлені.

Точність важлива для багатьох додатків, особливо для тих, де важлива правильність інформації, наприклад, в телефонних розмовах, передачі файлів або відеоконференціях. Для забезпечення високої точності передачі даних мережеві пристрої можуть використовувати різні технології, такі як контрольні суми, перевірку на помилки та механізми автоматичного відновлення.

"Захищеність" в контексті мережевого обслуговування (QoS) відноситься до рівня захисту мережі та передаваних даних від несанкціонованого доступу, зміни чи пошкодження. Це включає в себе заходи безпеки, такі як шифрування даних, аутентифікація користувачів, виявлення та захист від атак, таких як DDoS (розподілена атака на відмову в обслуговуванні) або вірусів.

Захищеність мережі та даних є критично важливою для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності інформації. Недостатня захищеність може призвести до втрати даних, порушення приватності

користувачів та збоїв в роботі мережі. Тому захищеність є важливим аспектом QoS, який потребує постійного вдосконалення та вдосконалення заходів безпеки.

"Простота" в контексті мережевого обслуговування (QoS) може вказувати на легкість управління, конфігурації та використання мережі. Простота є важливою для забезпечення ефективності та зручності користування мережею.

Простота може бути досягнута за допомогою простих та інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів управління мережею, автоматизації процесів конфігурації та моніторингу, а також стандартизації процедур управління та експлуатації мережі. Простота допомагає знизити витрати на підтримку мережі, покращити якість обслуговування та забезпечити більш ефективно використання ресурсів.

"Гнучкість" в контексті мережевого обслуговування (QoS) вказує на можливість мережі адаптуватися до змінних вимог та умов використання. Гнучкість дозволяє мережі ефективно використовувати ресурси та надавати високу якість обслуговування незалежно від змін у трафіку, конфігурації або технологічних умов.

Забезпечення гнучкості в мережі може включати в себе розгортання та масштабування нових послуг з мінімальними змінами у мережевій інфраструктурі, автоматизацію процесів управління та налагодження мережі, а також підтримку різноманітних технологій та протоколів для взаємодії з різними типами пристроїв та додатків. Гнучкість дозволяє мережам ефективно відповідати на зміни у вимогах користувачів та ринкових умовах, що робить їх більш конкурентоспроможними та ефективними.

Пропускна спроможність є основним параметром QoS, який має головний вплив на експлуатаційні якості, що сприймаються кінцевим користувачем. вплив на експлуатаційні якості, що сприймаються кінцевим користувачем. Багато користувацькі додатки мають мінімальні вимоги до пропускну здатності, ці вимоги мають бути враховані під час укладання угод на обслуговування. Рек. МСЕ-Т Y.1540 не визначає параметр пропускну

здатності, проте в ній визначається параметр втрати пакетів. Загублені біти або октети можуть бути відняті із загальної кількості відправленої інформації для попереднього визначення пропускнуої здатності мережі. Незалежне визначення пропускнуої здатності підлягає подальшому вивченню.[11]

Передбачається, що користувач і постачальник мережевих послуг мають домовленість про максимальну пропускну спроможність доступу, яка буде доступна одному або декільком потокам пакетів з певним класом QoS (за винятком невизначеного класу). Поток пакетів є трафік, пов'язаний із заданим потоком, що має з'єднання, або без логічного з'єднання, який має однакові хост-джерело (SRC), хост-одержувач (DST), клас обслуговування та ідентифікатор сеансу. В інших документах можуть використовуватися терміни мікропотік або складений потік при зверненні до потоків трафіку з даним ступенем класифікації. Спочатку договірні сторони можуть використовувати будь-яку специфікацію пропускнуої здатності, яку вони вважають потрібною, доти, доки постачальник мережевих послуг підтримує її реалізацію, а користувач проходить перевірку на її використання. Наприклад, зазначення пікової швидкості передачі даних для каналу доступу (включно з витратами нижнього рівня) може бути достатнім. Постачальник мережевих послуг погоджується передавати пакети на рівні певної пропускнуої здатності, відповідно до обумовленого класу QoS.

2.2 Архітектури радіопередавачів та радіоприймачів у міліметровому діапазоні

Архітектури радіопередавачів та радіоприймачів у міліметровому діапазоні (мм діапазоні) можуть бути вкрай різноманітними залежно від конкретних вимог та умов застосування. Однак, в цьому діапазоні частот можна виділити декілька загальних архітектурних підходів:

Архітектура радіопередавача:

Безпроводні системи з мікропроцесорами (SoC): Ці системи використовують вбудовані мікропроцесори для управління та обробки сигналів.

Модульні радіопередавачі: Радіопередавачі можуть бути розроблені як окремі модулі, які можна встановити на плату або інтегрувати в інші системи.

Фазові масивні антени (РАА): Вони використовуються для формування просторової діаграми напрямленості та підвищення пропускної здатності системи передачі.

Архітектура радіоприймача (рисунок 2.1, 2.2):

Супергетеродинні радіоприймачі: Вони використовують перетворення частот для перенесення сигналів на більш низькі інтермедійні частоти для подальшої обробки.

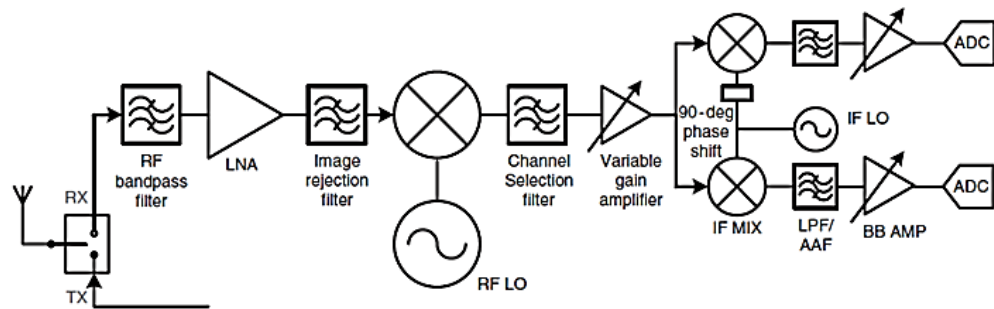


Рисунок 2.1 - Аналоговий інтерфейс супергетеродинного приймача

Прямі радіоприймачі (zero-IF або direct-conversion) рисунок 2.2. Ці приймачі використовуються для прийому сигналів безпосередньо на базову частоту без перетворення частот.

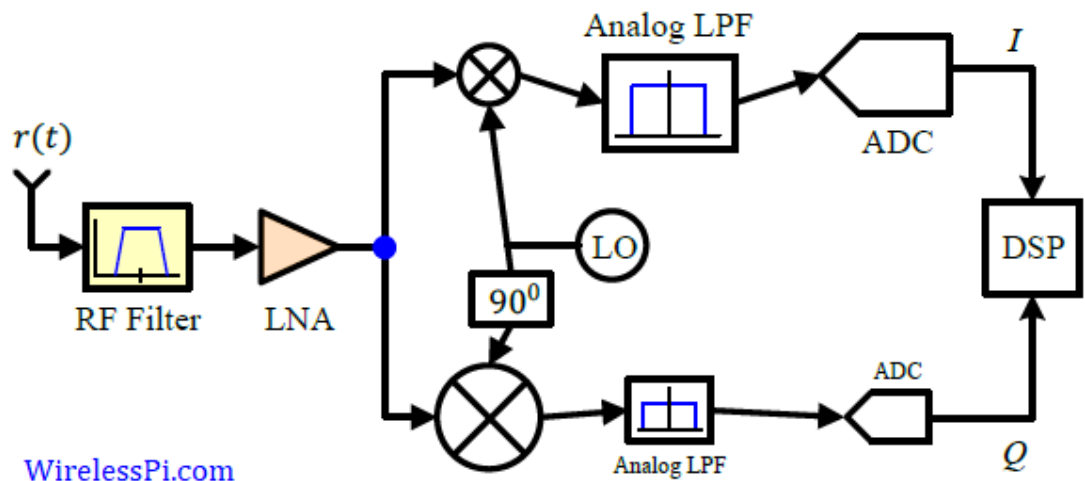


Рисунок 2.2 - Прямий радіоприймач (zero-IF або direct-conversion)

Одним з рішень цієї проблеми є застосування складної обробки сигналу і змішування сигналу з комплексною синусоїдою частоти, яка має єдиний імпульс у своєму спектрі на цій частоті. Ця операція створює складний сигнал, спектр якого є просто зсунутою версією спектра реального сигналу через згортку з цим єдиним імпульсом. Це показано на рисунку 2.3., де одностороннє спектральне перетворення реального сигналу R_x усуває необхідність у фільтрі відкидання зображення. Слід пам'ятати, що повне усунення відбувається лише в теоретичному сенсі, оскільки недосконалість аналогового інтерфейсу призводить до обмеженого придушення.

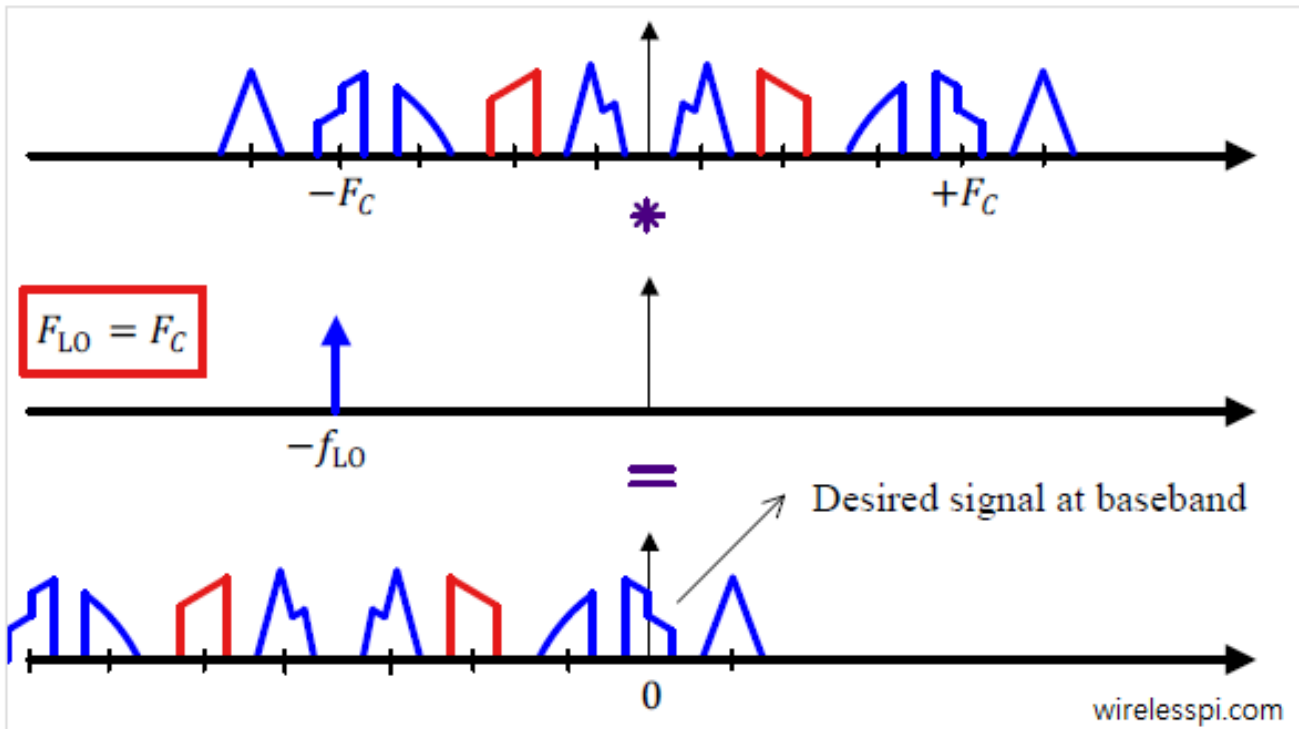


Рисунок 2.3 - Складний сигнал приймача zero-IF

У міліметровому діапазоні частот важливою є висока точність і стабільність сигналу, оскільки атмосферні умови можуть суттєво впливати на поширення радіохвиль. Тому архітектури радіопередавачів та радіоприймачів у міліметровому діапазоні зазвичай мають бути дуже ефективними та добре оптимізованими для забезпечення надійного та ефективного зв'язку.

2.3 Модель погонного ослаблення в дощі, що використовується в методах прогнозування

Асамблея радіозв'язку МСЕ,

враховуючи

а) необхідність розрахунку ослаблення сигналу в дощі за даними про інтенсивність дощу,

рекомендує,

1 щоб при розрахунку ослаблення використовувалася така процедура.

Співвідношення між погонним ослабленням, γ_R (дБ/км), та інтенсивністю дощу, R (мм/год), описується степеневим законом:

$$\gamma_R = kR^a \quad 2.1$$

Значення коефіцієнтів k і a визначаються у функції частоти f (ГГц) у діапазоні від 1 до 1000 ГГц з наступних рівнянь, які були складені виходячи з апроксимації кривої за коефіцієнтами степеневі залежності, отриманими з обчислень розсіювання:

$$\log_{10}k = \sum_{j=1}^4 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_k \log_{10}f + c_k \quad 2.2$$

$$a = \sum_{j=1}^4 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_a \log_{10}f + c_a \quad 2.3$$

Значення констант для коефіцієнта k_H у разі горизонтальної поляризації наведені в таблиці 2.1, а для коефіцієнта k_V у разі вертикальної поляризації - у таблиці 2.2. У таблиці 2.3 наведено значення констант для коефіцієнта a_H у разі горизонтальної поляризації, а в таблиці 2.4 - значення констант для коефіцієнта a_V у разі вертикальної поляризації.

Таблиця 2.1 – Значення констант для коефіцієнта k_H горизонтальна поляризація

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400	-0,18961	0,71147
3	-0,23789	0,86036	0,15354	-0,18961	0,71147
4	-0,94158	0,64552	0,16817	-0,18961	0,71147

Таблиця 2.2 – Значення констант для коефіцієнта k_V вертикальна поляризація

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297

2	-3,44965	-0,22911	0,51059	-0,16398	0,63297
3	-0,39902	0,73042	0,11899	-0,16398	0,63297
4	0,50167	1,07319	0,27195	-0,16398	0,63297

Таблиця 2.3 – Значення констант для коефіцієнта a_H горизонтальна поляризація

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822	0,67849	-1,95537
3	0,32177	0,63773	0,13164	0,67849	-1,95537
4	-5,37610	-0,96230	1,47828	0,67849	-1,95537
5	16,1721	-3,29980	3,43990	0,67849	-1,95537

Таблиця 2.4 – Значення констант для коефіцієнта a_V вертикальна поляризація

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039	-0,053739	0,83433
3	-0,20238	1,14520	0,26809	-0,053739	0,83433
4	-48,2991	0,791669	0,116226	-0,053739	0,83433
5	48,5833	0,791459	0,116479	-0,053739	0,83433

У разі лінійної та кругової поляризації для будь-якої геометрії траси коефіцієнти в рівнянні (2.1) можна обчислити за значеннями, заданими рівняннями (2.2) і (2.3), за допомогою таких рівнянь:

2.4 Рекомендована оцінка частотних діапазонів 5G

Частотні діапазони для 5G мереж зазвичай включають:

Частоти нижчого діапазону (sub-6 GHz): Цей діапазон використовується для забезпечення широкого покриття та підтримки масових підключень. Діапазони можуть варіюватися від приблизно 600 МГц до 6 ГГц.

Міліметрові хвилі (міліметровий діапазон, mmWave): Цей діапазон (24 ГГц та вище) може забезпечувати велику пропускну здатність та швидкість

передачі даних, але має обмежене покриття і проникнення через перешкоди.

Частоти нижчого середнього діапазону (mid-band): Діапазони від 2,4 ГГц до приблизно 4,2 ГГц використовуються для компромісу між швидкістю передачі даних та покриттям.

Частоти високого діапазону (high-band): Цей діапазон, який включає міліметрові хвилі, зазвичай має діапазон від 24 ГГц до 100 ГГц і використовується для забезпечення високої пропускної здатності та швидкості передачі даних, особливо у великих містах та густонаселених районах.

Частоти додаткового середнього діапазону (additional mid-band): Деякі оператори можуть розглядати додаткові середні частоти від 3,3 ГГц до 4,2 ГГц для збільшення пропускної здатності мережі 5G.

Ліцензовані та неліцензовані частоти: Оператори можуть використовувати як ліцензовані, так і неліцензовані частоти для розгортання мережі 5G. Неліцензовані частоти, такі як 5 ГГц (використовуються для Wi-Fi), можуть допомогти забезпечити додаткову ємність та покриття в певних областях.

Рекомендована оцінка частотних діапазонів залежить від конкретних умов та цілей розгортання мережі 5G. Наприклад, для широкого покриття рекомендується використовувати нижні діапазони, а для високошвидкісних та високонавантажених областей може бути вигідним використання mmWave.

Розгортання мереж 5G потребує уважного планування, щоб забезпечити оптимальний баланс між швидкістю передачі даних і покриттям. Для досягнення цього балансу важливо враховувати різні аспекти:

Вибір частотних діапазонів: Використання різних діапазонів дозволяє досягти різних цілей. Нижчі частоти забезпечують краще проникнення і покриття, але меншу пропускну здатність. Високі частоти можуть забезпечити високу пропускну здатність, але обмежене покриття.

Планування мережі: Важливо враховувати географічні особливості місцевості для оптимального розміщення базових станцій і забезпечення найкращого можливого покриття.

Керування ресурсами: Ефективне управління ресурсами мережі дозволяє максимізувати використання доступних пропускних здатностей та забезпечити якісний обслуговування для кожного користувача.

Урахування обсягу трафіку: Зростання обсягу мережевого трафіку вимагає від операторів мереж 5G здатності швидко адаптуватися до змін та забезпечувати стабільне обслуговування в умовах великих навантажень.

Застосування нових технологій: Впровадження технологій, таких як масивні МІМО, дозволяє підвищити продуктивність мережі та покращити якість обслуговування користувачів.

Розгортання внутрішніх мереж: Для забезпечення надійного зв'язку в приміщеннях важливо розглядати використання підсилювачів сигналу або мікро-базових станцій.

Ці аспекти допомагають операторам мереж 5G досягти оптимального балансу між швидкістю, покриттям та якістю обслуговування, що є ключовим для успішного розгортання та експлуатації мереж п'ятого покоління.

Для подальшого розвитку мереж 5G важливо також враховувати розвиток інфраструктури та впровадження нових технологій:

Розвиток інфраструктури: Швидке впровадження мереж 5G потребує значних інвестицій у покращення інфраструктури. Це включає в себе встановлення нових базових станцій, оновлення мережевого обладнання та підключення нових користувачів.

Впровадження віртуалізації мережі: Використання віртуалізованих мереж дозволяє операторам швидше реагувати на зміни у вимогах мережі та ефективніше управляти ресурсами.

Розширення додаткових послуг: 5G відкриває нові можливості для додаткових послуг, таких як віртуальна реальність, інтернет речей та автономні транспортні засоби. Розвиток цих послуг вимагає розширення мережі та вдосконалення технологій передачі даних.

Стандартизація інтерфейсів: Для забезпечення сумісності та інтероперабельності мереж 5G важлива стандартизація інтерфейсів та

протоколів передачі даних.

Забезпечення безпеки: Розвиток мереж 5G потребує підвищених заходів безпеки для захисту від кібератак та забезпечення конфіденційності даних користувачів.

Екологічні аспекти: При розвитку мереж 5G важливо враховувати екологічні аспекти, такі як енергоефективність та вплив на довкілля, і шукати способи зменшення викидів та оптимізації споживання енергії.

Ці аспекти разом забезпечують ефективний та стабільний розвиток мереж 5G, що відповідає сучасним вимогам до швидкості, надійності та доступності зв'язку.

Додаткові аспекти, які можна врахувати при розвитку мереж 5G, включають:

Розробка нових бізнес-моделей: Розгортання мереж 5G відкриває нові можливості для створення інноваційних бізнес-моделей, таких як платформи для обробки та аналізу великих обсягів даних, спільне використання інфраструктури та інше.

Підтримка мобільності: Мережі 5G повинні забезпечувати надійний та стійкий зв'язок для користувачів, що пересуваються, таких як пасажери громадського транспорту та водії автотранспортних засобів.

Розвиток мережі з малою затримкою (Low Latency Networks): Для додатків, які вимагають мінімальної затримки, таких як інтерактивні ігри, віртуальна реальність та автономний транспорт, важливо розвивати мережі з малою затримкою.

Розвиток мереж для промислових застосувань (Industry 4.0): Мережі 5G можуть бути використані для підтримки промислових застосувань, таких як машинне бачення, віддалене керування та моніторинг у реальному часі.

Розробка мереж для критичних застосувань: Для критичних застосувань, таких як медичні послуги та аварійні служби, важливо мати стабільні та надійні засоби зв'язку.

3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Проведення дослідження інтенсивності дощу у весняні місяці

Дослідження провадились протягом трьох весняних місяців за допомогою Gravity: Вимірювач кількості опадів - I2C & UART(рисунок 3.1)



Рисунок 3.1 - Gravity: Вимірювач кількості опадів

Отримані результати показали наступну інтенсивність дощу. Таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 – результати експерименту

Дата та час	Інтенсивність дощу
2024/3/14 8:31:20	0.28
2024/3/14 9:0:23	0.56
2024/3/14 9:19:25	0.84
2024/3/14 9:32:27	1.12
2024/3/14 10:1:30	1.40
2024/3/14 18:40:33	1.68
2024/3/14 19:6:36	1.96
2024/3/14 19:9:36	2.24
2024/3/14 19:46:41	2.51
2024/3/14 20:55:49	2.79
2024/3/15 2:9:27	3.07
2024/3/20 15:54:0	3.35
2024/4/17 9:0:43	0.28
2024/4/18 11:22:56	0.56
2024/4/18 15:1:23	0.84
2024/4/20 17:5:26	1.68
2024/4/20 17:11:27	1.96
2024/4/20 17:24:29	2.24
2024/4/20 17:45:31	2.79
2024/4/20 17:50:32	3.07
2024/4/20 18:8:34	3.63
2024/4/20 19:24:43	3.91
2024/4/21 11:17:38	4.19
2024/4/22 21:10:48	4.47
2024/4/22 22:22:57	5.59
2024/4/22 22:54:0	5.87
2024/4/22 23:21:4	6.15
2024/4/22 23:51:7	6.43
2024/4/23 1:43:21	6.71
2024/4/23 7:15:1	6.99
2024/4/29 2:12:21	0.84
2024/5/7 14:50:58	0.28
2024/5/7 14:51:59	0.56
2024/5/7 14:59:	1.12
2024/5/7 15:1:0	1.68
2024/5/7 15:2:0	1.96
2024/5/7 15:3:0	2.51
2024/5/7 15:4:0	2.79
2024/5/7 15:5:0	3.07
2024/5/7 15:20:2	3.35
2024/5/7 17:30:21	3.63
2024/5/7 17:31:21	4.19

Продовження таблиці 3.1

2024/5/7 17:32:21	4.75
2024/5/7 17:33:21	5.03
2024/5/7 17:53:24	5.31
2024/5/7 17:54:24	5.59
2024/5/7 17:55:24	5.87
2024/5/7 17:56:24	6.15
2024/5/7 17:59:24	6.43
2024/5/7 18:2:25	6.71
2024/5/7 18:8:25	6.99
2024/5/7 18:16:26	7.26
2024/5/7 18:29:28	7.82
2024/5/7 18:34:29	8.10
2024/5/7 18:43:30	8.66
2024/5/7 18:48:31	8.94
2024/5/7 18:55:31	9.50
2024/5/7 18:57:32	10.34
2024/5/7 19:3:32	10.62
2024/5/7 19:46:38	10.90
2024/5/7 19:58:39	11.18
2024/5/7 21:31:51	11.46
2024/5/7 21:32:51	11.73
2024/5/7 21:33:51	12.29

Ці дані відображають інтенсивність дощу у вказані дати та час. Інтенсивність вимірюється у міліметрах на годину (мм/год). Наприклад, 0.28 вказує на легкий дощ, тоді як 12.29 вказує на дуже сильний дощ.

Маючи ці дані легко розрахувати захасання ММ хвиль у дощі. Для зручності напишемо для цього програму.

```
using System;
```

```
using System.Data;
```

```
клас Program
```

```
{
```

```
    static void Main()
```

```
    {
```

```
Console.WriteLine("Введіть значення k: ");
string inputK = Console.ReadLine();

Console.WriteLine("Введіть значення R: ");
string inputR = Console.ReadLine();

Console.WriteLine("Введіть значення a: ");
string inputA = Console.ReadLine();

// Спроба перетворити введені рядки в числа
if (double.TryParse(inputK, out double k) &&
    double.TryParse(inputR, out double R) &&
    double.TryParse(inputA, out double a))
{
    // Обчислення результату
    double result = Math.Pow(R, a) * k;
    double Y;
    Y = Math.Pow(R, a) * k;

    // Виведення результату

    Console.WriteLine("погонне ослаблення дорівнює");
    Console.WriteLine(result);
}
else
{
    Console.WriteLine("Помилка введення. Будь ласка, введіть
коректні числа з плаваючою крапкою.");
}
```

```

// Очікування натискання клавіші перед виходом
Console.WriteLine("Натисніть будь-яку клавішу для виходу...");
Console.ReadKey();
}
}

```

Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

3.2 Розрахунок погонного ослаблення

Для розрахунку погонного ослаблення використаємо формулу

$$\gamma_R = kR^a \quad 3.1$$

Значення k та a наведені в РЕКОМЕНДАЦІЇ МСЕ-R P.838-3. Для частоти 90ГГц значення k дорівнює 1,2795, значення a дорівнює 0,6876. Провівши розрахунки отримуємо наступні результати (таблиця 3.2)

Таблиця 3.2 – розрахунки загасання на частоті 90ГГц в опадах

Інтенсивність дощу мм/г	Загасання дБ/км
0.28	0.53
0.56	0,85
0.84	1,13
1.12	1,38
1.40	1,61
1.68	1,82
1.96	2,03
2.24	2,22
2.51	2,4
2.79	2,58
3.35	2,93
0.28	0.53

0.56	0,85
------	------

Продовження таблиці 3.2

Інтенсивність дощу мм/г	Загасання дБ/км
1.68	1,82
1.96	2,03
2.24	2,22
2.79	2,58
3.63	3,1
3.91	3,26
4.19	3,42
4.47	3,58
5.59	4,17
5.87	4,32
6.15	4,46
6.43	4,6
6.71	4,73
6.99	4,87
0.84	1,13
0.28	0,53
0.56	0,85
1.12	1,38
1.68	1,82
1.96	2,03
2.51	2,4
2.79	2,58
3.35	2,93
3.63	3,1
4.19	3,42
4.75	3,73
5.31	4,03
5.59	4,17
5.87	4,32
6.15	4,46
6.43	4,6
6.71	4,73
6.99	4,87

7.26	5
7.82	5,26

Продовження таблиці 3.2

Інтенсивність дощу мм/г	Загасання дБ/км
8.66	5,64
8.94	5,75
9.50	6,01
10.34	6,37
10.62	6,49
10.90	6,61
11.18	6,72
11.46	6,84
11.73	6,95
12.29	7,16

На рисунках 3.2, 3.3 та 3.4 представлені графіка загасання у березні, квітні та травні.

Загасання дБ/км относительно параметра "Інтенсивність дощу мм/г" Березень

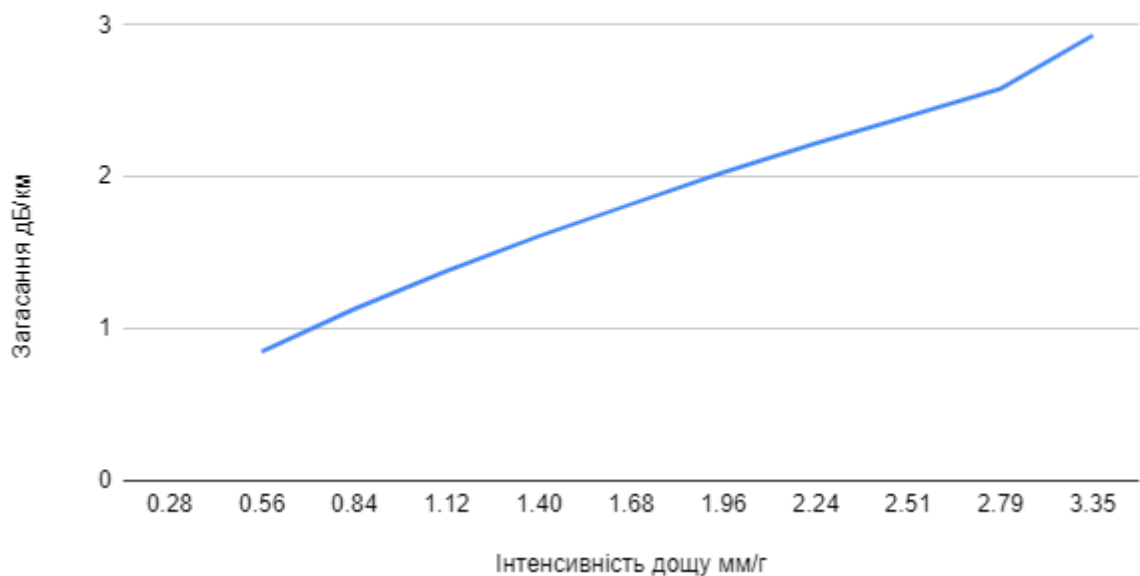


Рисунок 3.2 – вплив опадів на діапазон хвиль 90 ГГц (Березень)

Загасання дБ/км относительно параметра "Інтенсивність дощу мм/г" Квітень

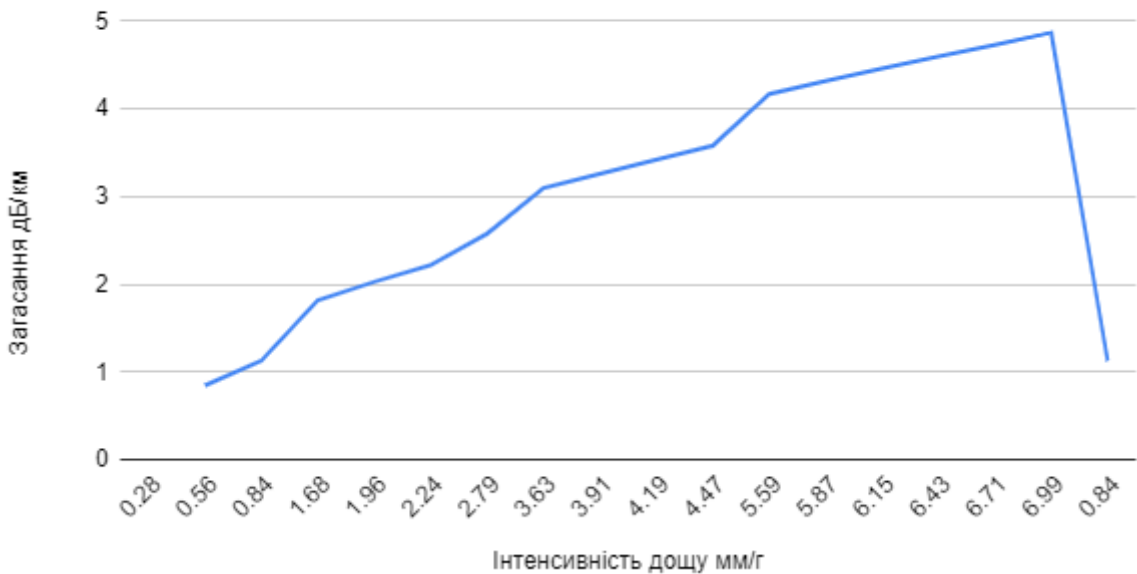


Рисунок 3.3 – вплив опадів на діапазон хвиль 90 ГГц (Квітень)

Загасання дБ/км относительно параметра "Інтенсивність дощу мм/г" Травень

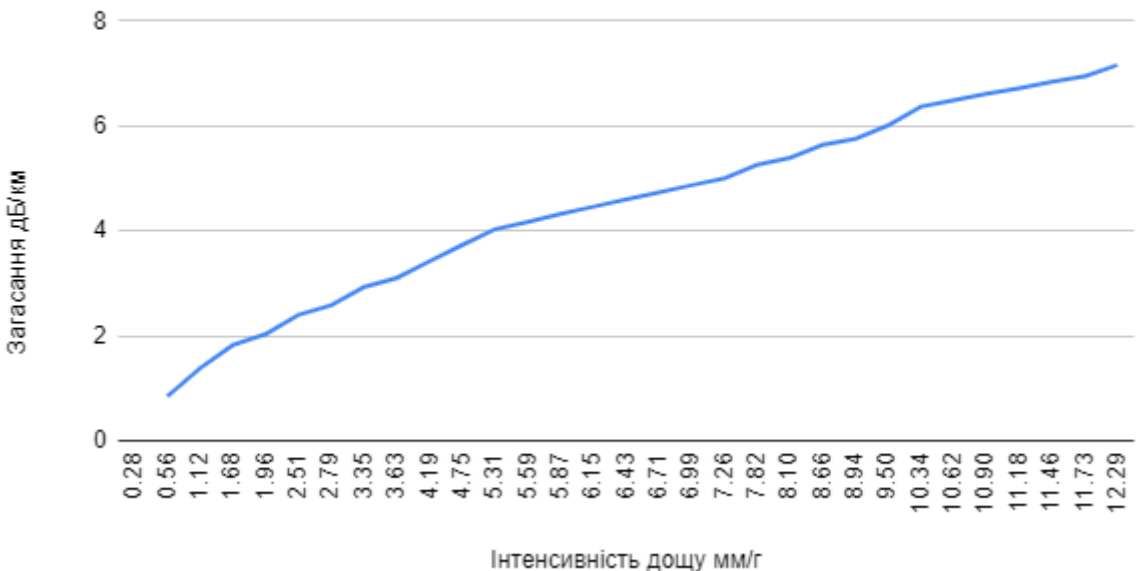


Рисунок 3.4 – вплив опадів на діапазон хвиль 90 ГГц (Травень)

Як видно з розрахунків та графіків найбільша інтенсивність дощів була у травні, при побудові радіоліній завжди потрібно орієнтуватися на найгірші місяці року і виходячи з розрахунків підбирати правильне обладнання для стабільної роботи радіоліній.

Для правильної побудови лінії на 5 км з втратами сигналу 7,16 дБ на кожен кілометр, ви можете скористатися наступним методом:

Розрахунок загальних втрат сигналу: Загальні втрати сигналу для 5 км лінії розраховуються як $7,16 \text{ дБ/км} * 5 \text{ км} = 35,8 \text{ дБ}$.

Розрахунок початкової потужності сигналу: Нехай початкова потужність сигналу буде P_0 дБм.

Розрахунок кінцевої потужності сигналу: Кінцева потужність сигналу P_k буде рівною початковій потужності мінус загальні втрати сигналу: $P_k = P_0 - 35,8 \text{ дБ}$.

Врахування початкової потужності сигналу: Якщо початкова потужність сигналу P_0 відома, можна визначити кінцеву потужність сигналу P_k .

Врахування кінцевої потужності сигналу: Якщо кінцева потужність сигналу P_k відома, можна визначити початкову потужність сигналу P_0 .

Побудова лінії: Після визначення початкової та кінцевої потужностей сигналу, можна побудувати лінію, яка відобразить втрати сигналу на кожному кілометрі у вигляді графіка.

Для побудови лінії на 5 км з втратами сигналу 7,16 дБ на кожен кілометр оптимально використовувати наступні значення:

Початкова потужність сигналу (P_0): Прийнято, що початкова потужність сигналу для такої лінії становить близько 30 дБм.

Загальні втрати сигналу: $7,16 \text{ дБ/км} * 5 \text{ км} = 35,8 \text{ дБ}$.

Кінцева потужність сигналу (P_k): $P_k = P_0 - 35,8 \text{ дБ} = 30 \text{ дБм} - 35,8 \text{ дБ} = -5,8 \text{ дБм}$.

Отже, оптимальною буде початкова потужність сигналу 30 дБм і загальні втрати сигналу 35,8 дБ на 5 км лінії з використанням втрат сигналу 7,16 дБ на кожен кілометр.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та аналізу застосування міліметрового діапазону радіохвиль у бездротовому зв'язку. Робота складається з таких розділів.

Області застосування міліметрового діапазону: Розглянуто можливості використання міліметрового діапазону для бездротового доступу до Інтернету, проведення прольотів точка-точка та вивчення діаграм спрямованості в цьому діапазоні. Також проаналізовано вплив клімату на поширення і загасання радіохвиль цього діапазону.

Оцінка продуктивності ліній зв'язку міліметрового діапазону: Розглянуто визначення параметрів ліній зв'язку, архітектури радіопередавачів та радіоприймачів у міліметровому діапазоні. Також досліджено модель погонного ослаблення в дощі та наведено рекомендації щодо оцінки частотних діапазонів 5G.

Розрахункова частина: Описано проведення дослідження інтенсивності дощу у весняні місяці та розрахунок погонного ослаблення для оцінки продуктивності ліній зв'язку в міліметровому діапазоні.

Кваліфікаційна робота містить важливі результати дослідження застосування міліметрового діапазону у бездротовому зв'язку, що можуть бути корисними для подальших розробок та вдосконалення систем зв'язку на цьому діапазоні.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Аппаратурнометодическое обеспечение научноприкладной радиометрии атмосферы / В.К. Волосюк, С.С.Жила, А.Д. Собколов, В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, Д.С. Сальников, А.А. Мерзликин, А.И. Цопа // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.техн. сб. – 2019. – Выпуск № 196. – С. 5 21.
2. Кумулятивные функции вертикального атмосферного ослабления миллиметровых радиоволн над Харьковом / С.С.Жила, А.А. Мерзликин, А.В. Одокиенко, В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, А.Д. Собколов, А.И. Цопа // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научнотехнический сборник. – 2019. – Выпуск № 199. – С. 8390.
3. Определение характеристик готовности и пропускной способности канала связи миллиметрового диапазона волн. / А.А. Мерзликин, Д.С.Сальников, А. Н. Битченко, Н.В. Руженцев, А. И. Цопа // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научнотехнический сборник. – 2019. – Выпуск № 199. – С. 4553.
4. Tsopa O., Dudka O., Merzlikin A., Astrashkov M. Performance Evaluation of 5G MillimeterWave Cellular Network in dense Urban Development / Journal Review of International Geographical Education. – SPRING, 2021; – №11(8); – pp. 15921600. (Scopus)
5. Odokienko O.V., Pavlikov V.V, Ruzhentsev N.V., Volosyuk V.K., Zhyla S.S.Two Frequency Radiometric Complex for Atmosphere Research // Proceedings of the 14th International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2018), LvivSlavsko, Ukraine, February 23–26, 2018, p. 28 – 31.
6. Том 1 № 28 (2016): Адаптивні системи автоматичного управління . Аналіз розвитку сучасних технологій мобільного зв'язку Ярослав Ігорович Корнага к.т.н., доцент кафедри технічної кібернетики НТУУ «КПІ», Ярослав Євгенович Горбунов студент кафедри технічної кібернетики НТУУ «КПІ»,

7. M. Xiao et al., "Millimeter wave communications for future mobile networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 9, pp. 1909-1935, Sep. 2017.
8. Z. Pi, J. Choi, R. Heath, "Millimeterwave gigabit broadband evolution toward 5G: Fixed access and backhaul", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 138-144, Apr. 2016.
9. J. G. Andrews et al., "What will 5G be?", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
10. T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!", *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, May 2013.
11. H. Zhao et al., "28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York City," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Jun. 2013, pp. 5163–5167