

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування.

Керівник

Руженцев М.В.

Студент

Кондратенко О.В.

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 Кондратенко Ользі Віталіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження проходження радіохвиль міліметрового діапазону через різні види матерії

затверджена наказом по університету від 05 листопада 2021 р. № 1647Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 03 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз роботи проходження радіохвиль міліметрового діапазону чнerez різні види матерії.

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

2. Аналіз роботи антен міліметрового діапазону.

3. Проведення експерименту проходження радіохвиль міліметрового діапазону через різні види матерії.

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 впливу перешкод на міліметровий діапазон	15.11.2021	Виконано
3	Дослідження особливостей роботи антени мм діапазону хвиль	22.11.2021	Виконано
4	Проведення експерименту проходження радіохвиль через різні види матерії	30.11.2021	Виконано
5	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: сторінок – 68, рисунків – 21, таблиць – 7, посилань на джерела – 18.

МІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН, РАДІОХВИЛЯ, ВИДИ МАТЕРІЇ,
МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК.

Об'єкт дослідження - Поширення радіохвиль міліметрового діапазону.

Предмет дослідження - Дослідження і оцінка роботи антен міліметрового діапазону з внесенням перешкод.

В кваліфікаційній роботі проведені огляд та досліджено проходження радіохвиль міліметрового діапазону через різні види матерії.

Проведено експеримент проходження радіохвиль міліметрового діапазону через різні види матерії.

ABSTRACT

The work contains: pages - 68, figures - 21, tables – 7, references to sources – 18.

MILLIMETER RANGE, RADIO WAVE, TYPES OF MATTER, MOBILE COMMUNICATION.

Object of research is - Propagation of millimeter-range radio waves.

Subject of research - Research and evaluation of the performance of millimeter-range antennas with interference.

In the attestation work, the passage of millimeter-range radio waves through different types of matter was inspected and studied.

An experiment of millimeter-range radio waves passing through different types of matter was performed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ У МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ	12
1.1 Необхідність зростання швидкості передачі у мережах мобільного зв'язку.....	12
1.2 Можливі напрямки для створення стандарту рухомого зв'язку 5G	15
1.3 Аналіз обмежень на розвиток нового покоління мобільного зв'язку.....	22
1.4 Постановка завдання дослідження	27
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАДІОКАНАЛІВ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ.....	30
2.1 Ослаблення сигналу під час поширення через канали ММД	30
2.2 Модель замирань сигналу в каналах ММД.....	32
2.3 Послаблення ММВ під час поширення в атмосфері	44
2.4 Ослаблення сигналів ММД у дощах, снігу, серпанку, пилу.....	46
2.5 Поширення ММВ над підстилаючою поверхнею.....	50
2.6 Поглинання міліметрових хвиль перешкодами.....	55
3 ПРОХОДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧЕРЕЗ РІЗНІ ВИДИ МАТЕРІЇ.....	58
3.1 Опис антен які використовувалися при проведенні експерименту	58
3.2 Опис експерименту.....	60
3.3 Результати експерименту	61
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ММ – міліметровий

СМ – сантиметровий

ММХ – діапазон міліметрових хвиль

ДХ – діапазон хвиль

ITU– International Telecommunication Union

КВП – коефіцієнт використання поверхні

ДНА – діаграма направленості антени

ІКТ - інформаційно-комунікаційні технології,

МЕС або ITU - Міжнародний союз електрозв'язку

ШПД - широкосмуговий доступ

GSM - глобальна система мобільного зв'язку

EDGE –технологія бездротової передачі даних для мобільного зв'язку

LTE – стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних

IoT - Інтернет речей

ММД – міліметровий діапазон

PPC - радіорелейний зв'язок

LMDS - локальна багатоточкова розподілена служба зв'язку

MVDS - багатоточкова розподілена відео служба

СУ - система управління

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Актуальність. Чисельність населення нашої планети поступово росте і вже перевищила 7 мільярдів осіб. Зростають та інформаційні потреби населення, а одночасно активно розвиваються технології «Інтернет речей» (IoT-пристроїв). За прогнозами фахівців, щомісячний обсяг інформації, що передається до 2020 року вимірюватиметься в Зеттабайтах ($1 \cdot 10^{21}$ байт). Чисельне зростання кількості абонентів і дедалі більші запити до інформаційного сервісу вимагає зростання швидкості передачі інформації в інфотелекомунікаційному просторі.

Відповідаючи на ці запити Міжнародна спілка електрозв'язку прийняла рішення про розвиток нового покоління мобільного зв'язку 5G зі швидкостями передачі даних не гірше 10 Гбіт/с при часі відгуку від однієї мілісекунди. Провідні світові виробники засобів передачі інформації дружно відгукнулися на це рішення, приділяючи особливу увагу розробці стандартів, дослідженням та розвитку обладнання покоління 5G. Однак зростання швидкості передачі інформації в основному можливе за рахунок розширення смуги використовуваних частот і вимоги до мереж передачі інформації покоління 5G, можна реалізувати лише в міліметровому діапазоні (ММД) частот.

Діапазон міліметрових хвиль (ММХ) досить добре вивчений, але використовується не повністю, що пояснюється як сильним загасанням ММХ при поширенні, так і високою складністю розробки та виробництва обладнання цього діапазону частот. Ця суперечність ставить важливе наукове та практичне завдання розробки та створення програмно-апаратних засобів, здатних стати універсальним інструментарієм для оцінки якості розробок нових пристроїв для міліметрового діапазону частот.

Дослідженням ММД приділено велику увагу в роботах як вітчизняних, так і зарубіжних вчених всього світу, таких як Бистров Р.П., Соколов А. В., Чеканов Р.М., Яковлев О.І., Калмиков Ю. П, Тітов С.В., Андрєєв Г.А., Паршин Ст Ст, Третьяков М. Ю., Кошелєв М. А., Павельєв В.А., Хамінов Д.В., Зражевський А.Ю., Красюк В.М.,

Anderson C. R., Rappaport T.S., Alejos A., Sanchez M.G., Frenzel L., Pi Z., Khan F., Cuinas I., Doann C.H., Xu H. та багатьох інші. Моделюванню радіоканалів присвячені роботи Кловського Д.Д., Самойлова А.Г., Галкіна А.П., Шинакова Ю.С., Маркова В.В., Іванова А.П., Єрмолаєва В.Т., Erceg V., Schumacher L., Watterson S.S., Jroshek J.R., Dtnsema V.D., Bello P., Son V.V. та інших.

Задача проведення експерименту проходження радіохвиль міліметрового діапазону через різні види матерії досить амбітна, але необхідна для розвитку покоління мобільного зв'язку 5G. Ця задача актуальна, а велика кількість досліджень міліметрового діапазону частот створили для її вирішення необхідну базу.

Метою дослідження є аналіз властивостей проходження радіохвиль міліметрового діапазону частот.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз та визначити характеристики факторів, що впливають на передачу інформації по радіоканалах ММД;
- розробити математичну модель каналу ММД;
- запропонувати структуру комплексу імітації радіоканалів (KIPK) ММД;
- провести експеримент проходження радіохвиль через перешкоди;

Предметом дослідження є характеристики радіоканалів міліметрового діапазону частот.

Об'єктом дослідження є проходження радіохвиль міліметрового діапазону через перешкоди.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань використовувалися методи, засновані на положеннях загальної теорії зв'язку, теорії поширення сигналів, методів теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії експерименту.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи полягає у наступному:

1. Визначено вирази для імітації послаблень сигналів і завмирань у радіоканалах ММД при різних кліматичних та географічних параметрах модельованих трас зв'язку.

2. Запропоновано моделі передаточних функцій радіоканалів ММД для стаціонарних та мобільних абонентів.

Достовірність та обґрунтованість результатів роботи підтверджуються коректним використанням положень теорії поширення сигналів та загальної теорії зв'язку, застосуванням використовуваних методик, а також не протиріччям результатів, отриманих у роботі, відомими з літератури.

1 ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ У МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Необхідність зростання швидкості передачі у мережах мобільного зв'язку.

В останні десятиліття у всьому світі стрімко розвиваються інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ), що безпосередньо впливають на розвиток економіки, освіти, науки, охорони здоров'я, культури та способу життя людини. За даними Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ) вже в 2012 році Інтернетом користувався кожен третій житель Землі, і кількість користувачів неухильно зростає. ІКТ та послуги на базі широкосмугового доступу (ШПД) рік у рік стають все більш доступними для населення, зокрема і за вартістю [1].

Більшість сервісів та програм цифрового контенту стають мобільними, оскільки мобільні пристрої дедалі активніше входять у життя людей. Кількість смартфонів, що продаються в світі, вже в 2014 році перевищила кількість телефонів, що продаються, і мобільний контент, що доставляється через мобільні сервіси та додатки, вже став для населення найбільш доступним способом отримання інформації.

В даний час немає сумнівів, що тільки універсальний ШПД може забезпечити населенню повноцінний сервіс від цифрового контенту, включаючи не лише голосову телефонію, а й різноманітні мультимедійні послуги. Найбільші світові компанії, такі, наприклад, як Cisco, прогнозують на найближчі п'ять років десятикратне збільшення трафіку, що використовується в мобільних мережах для передачі даних.

Розвиток ШПД вимагає збільшення швидкості передачі цифрової інформації та її обробки. На прикладі мобільного зв'язку можна показати, як світова наука розвиває ці напрямки.

У далекому 1981 році шведська компанія «Еріксон» ввела в експлуатацію в Саудівської Аравії першу у світі мережу стільникового зв'язку на основі стандарту NMT-450 (Nordic Mobile Telephone) і МСЕ оголосив про створення першого

покоління мобільних телекомунікаційних мереж бездротового зв'язку, що використовують аналогову модуляцію радіосигналу за стандартом NMT і призначених для передачі тільки голосового трафіку. У цій технології, яка пізніше була названа поколінням стільникового зв'язку 1G, використовувалися частоти вище 150 МГц, а швидкість передачі становила 2,4 Кбіт/с.

Через 10 років аналогові системи бездротового зв'язку стали замінювати на цифрові за новим стандартом GSM (Global System for Mobile Communications – Глобальна система мобільного зв'язку). Перша у світі мережа GSM була побудована у 1991 році у Фінляндії. Стандарт GSM діє досі і майже 80% мереж мобільного сотового зв'язку більш ніж у 212 країнах побудовані на основі цього стандарту. Таке поширення стандарту дозволило організувати міжнародний роумінг між операторами мобільного зв'язку. Ці обставини, що стандарт цифровий і є можливість роумінгу стали головними відмінностями другого покоління сотового зв'язку 2G від покоління 1G.

Спочатку стандарт GSM дозволив передавати інформацію зі швидкістю до 64 Кбіт/с, але нові технології та сервіси призвели до того, що швидкість передачі поступово підвищувалася, з'явилася можливість передачі пакетних даних, отримання та відправлення електронної пошти, передача факсів, можливість роботи у web-браузері, конференцзв'язок та багато іншого.

Нові технології та сервіси, розвиваючи стандарт GSM, призвели до того, що друге покоління сотового зв'язку стали називати поколінням 2,5G або 2,75G залежно від швидкості передачі. Завдяки широкому переліку послуг стандарт GSM має міцні позиції на ринку сотового зв'язку та св даний час є лідируючим.

На даний час швидкість передачі інформації за стандартом GSM, завдяки технології EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) цифрова технологія бездротової передачі даних для мобільного зв'язку, яка функціонує як надбудова над 2G та 2.5G (GPRS) - мережами.), досягає 384 Кбіт/с.

Технології, що застосовуються в стандарті GSM, перестали задовольняти число користувачів мереж зв'язку зі швидкості передачі даних, що швидко зростає, що стимулювало розвиток систем третього покоління 3G в тестовому режимі запускених

в експлуатацію у кількох країнах у 2001 році. МЕМ затвердив стандарт ІМТ-2000, що описує технології 3G із забезпеченням доступу до Інтернету зі швидкістю 2 Мбіт/с для стаціонарного абонента. Але зростання швидкості до 2 Мбіт/с, захищеність персональних даних при роботі в мережі та інші позитивні особливості покоління 3G не задовольнили користувачів мереж і вже в 2009 році шведська компанія «Telia Sonera» запустила в Стокгольмі та в Осло комерційну мережу четвертого покоління 4G на основі стандарту LTE - (Long-Term Evolution - довготривалий розвиток, або стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних для мобільних телефонів та інших терміналів, що працюють з даними).

У 2010 році МЕМ опублікував вимоги до мереж покоління 4G. Головні вимоги полягали у швидкості передачі даних для стаціонарного абонента – 2 Гбіт/с та для мобільного 100 Мбіт/с. Однак високі вимоги до мереж 4G, а саме:

- висока швидкість обробки інформації;
- швидкість передачі даних від 100 Мбіт/с до 1Гбіт/с;
- смартфон як повноправний користувач глобальної мережі Інтернет;
- низька вартість трафіку та висока ціна мережевого обладнання стримують впровадження мереж 4G LTE.

В даний час найбільш ефективний обмін даними між мобільними пристроями відбувається в мережах LTE, що використовують Інтернет. Це сучасна технологія передачі IP-пакетами. Але обсяг трафіку, що безперервно зростає, вимагає все більш високих швидкостей передачі даних.

Настає час «Інтернету речей» (ІоТ-пристроїв), коли інформацію по Інтернету крім людей одночасно передаватиме велику кількість різних технічних пристроїв (датчики стану навколишнього середовища), середовища, світлофори, датчики освітлення, часу, контролю споживання тепла, води, електроенергії, автомобільні системи контролю руху, безпілотні пристрої тощо). І якщо у 2016 році по інтернету щомісяця передається $6 \cdot 10^{18}$ байт інформації (6 Ексабайт), то за прогнозами фахівців 2020 року десятки мільйонів машин обмінюватимуться інформацією по інтернету і щомісячний обсяг інформації, що передається, перевищить $1 \cdot 10^{21}$ байт (1Зеттабайт).

Ера «Інтернету речей» має на увазі, що майбутні мережі мобільного зв'язку повинні стати універсальними і дозволяти працювати як з короткими та повільними повідомленнями, так і передавати високошвидкісний трафік з швидкостями в десятки разів, що перевищують можливості мереж 4G LTE.

Слід зазначити, що зростання швидкості передачі цифрової інформації потребує насамперед збільшення швидкості її обробки. Завдання побудови мереж покоління 5G досить амбітне, але її втілення у життя у провідних телекомунікаційних компаній світу вже є.

1.2 Можливі напрямки для створення стандарту рухомого зв'язку 5G

Існуючі стандарти передачі, включаючи ще повністю освоєне покоління передачі даних 4G, із завданням щомісячної передачі до 1 Зеттабайта інформації не можуть впоратися. Тому вже активно ведуться роботи зі створення нового стандарту для технології передачі даних 5G, призначеного об'єднати в єдину мережу тисячі абонентів на один квадратний кілометр з різними технологіями бездротового з'єднання при швидкостях передачі даних 10 Гбіт/с та часу відгуку від однієї мілісекунди [2].

МЕС планує в якості продовження розвитку поколінь передачі інформації впровадження комерційних мереж п'ятого покоління. Такий план орієнтований на 2020 рік із вимогою максимальної швидкості передачі даних до 20 Гбіт/с та можливістю підключення до мільйона IoT пристроїв на площі в один квадратний кілометр.

Але зростання швидкості передачі інформації вимагає збільшення пропускної спроможності каналів зв'язку. Теорема К. Шеннона визначає пропускну здатність каналу зв'язку як

$$C = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{N} \right) = \Delta f \log_2 + \frac{E_b}{N_0} \left(\frac{C}{\Delta f} \right), \quad (1.1)$$

де Δf - займана системою смуга частот, P_c - середня потужність сигналу,

N – середня потужність шуму, E_b – енергія біта, N_0 – спектральна щільність потужності шуму.

З виразу 1.1 видно, що існує два шляхи збільшення пропускної здатності каналу зв'язку - це збільшення середньої потужності сигналу P_c по відношенню до сумарної енергії шуму та перешкод, а також розширення смуги частот Δf , яку займає сигнал.

Збільшення потужності сигналу P_c для мобільного зв'язку обмежується стандартами на допустимі рівні електромагнітного випромінювання та масогабаритними параметрами передавачі та джерел живлення носимих абонентських приймачів-акумуляторів. Крім того збільшення середньої потужності сигналу абонентського терміналу сотового зв'язку обмежується через негативні впливи електромагнітного випромінювання на людський організм і з цієї причини не перевищує 1 Вт [3].

Джерела живлення в даний час займають до 20% в масогабаритних параметрах абонентських систем мобільного зв'язку і збільшення P_c призведе не тільки до збільшення ваги трубки, що носить, але і значно скоротить час роботи акумулятора до наступного циклу заряду. Звичайно, роботи з створення ефективних акумуляторів електричної енергії інтенсивно ведуться у різних країнах світу. Літійово-іонні та літійово-полімерні, чи тієво-залізофосфатні, фторид-іонні та інші нові акумулятори, що прийшли порівняно недавно на зміну нікель-кадмієвим, помітно відбилися на якісних характеристиках обладнання сотового зв'язку, але на пропускну спроможність каналів передачі інформації практично вплинути не змогли [4].

Тому основний шлях для збільшення швидкості інформаційного обміну в мережах мобільного зв'язку полягає в розширення смуги частот Δf , що виділяється для інформаційного обміну і розширення смуги частот є основною умовою для створення нового покоління мобільного зв'язку 5G.

МЕС з 1995 року став міжнародним координатором робіт з електровзв'язку, спрямованих на створення глобального інформаційного суспільства.

Створивши Регламент радіозв'язку та розділивши поверхню Землі на три регіони на МЕС організував певний порядок у частотному користуванні. Однак

частотний ресурс, що належить всьому людству, виключно активно використовується і до теперішнього часу частотні діапазони нижче 5 ГГц практично перевантажені. Присвоєння радіочастот і радіочастотних каналів для радіоелектронних засобів у цих діапазонах здійснюється за технологіями частотно-територіального планування (ЧТП) [10] з обов'язковим розрахунком електромагнітної сумісності (ЕМС) радіозасобів. Тому один з основних напрямків створення нового покоління мобільної зв'язку 5G це освоєння частотних діапазонів вище 5 ГГц поки що недостатньо використовуються [5].

Відносно вільні ділянки спектра є поки що на надвисоких частотах, наприклад, на межі діапазонів X і C не зайнята смуга частот близько 1,5 ГГц. Але найменше освоєно міліметровий діапазон (ММД) хвиль, тому саме в цьому діапазоні можливий розвиток стандарту 5G зі швидкостями передачі від 1 до 10 Гбіт/с. Діапазон міліметрових хвиль використовується поки що не надто активно і вивчений ще не повністю. З цього цікавить дослідження можливостей мобільного зв'язку в цьому діапазоні хвиль.

Діапазон міліметрових хвиль виявився винятково вдалим для транспортних потоків у районах з високою щільністю радіоелектронних засобів на ділянках радіорелейного зв'язку прямої видимості протяжністю за кілька кілометрів. ММД виявився зручним для організації локальних інформаційних мереж та створення каналів "останньої милі" при передачі інформації. Додаткова перевага діапазону міліметрових хвиль полягає в тому, що в цьому діапазоні часто немає необхідності проводити мультиплексування сигналу, так як ширина смуги частот дозволяє конвертувати весь спектр сигналу транспортної мережі, в область міліметрових хвиль.

В даний час ММД використовується як у супутниковому зв'язку, так і в наземному радіорелейного зв'язку (PPC). Так для потреб комерційного зв'язку міліметровому діапазоні хвиль вже успішно використовуються піддіапазони частот 27-32 ГГц, 36-38 ГГц та 40.5-42.5 ГГц. Нижні з цих частот були освоєні в США для забезпечення радіодоступу при побудові телекомунікаційних мереж. Такі системи отримали назву LMDS (Local Multipoint Distribution Service – локальна багатоточкова

розподілена служба зв'язку). Пізніше технологію LMDS почали використовувати і для телевізійних мереж мовлення. У зв'язку з цим системи, що працюють на частотах 40.5-42.5 ГГц, отримали назву MVDS (Multipoint Video Distribution Systems - багатоточкова) розподілена відеослужба). У Росії широко використовуються наземні станції PPC в діапазоні 3640,5 ГГц. Однак вільні ділянки спектра в діапазоні міліметрових хвиль ще є, що і створює нішу для практичного застосування радіосистем цього діапазону в сучасному телекомунікаційному просторі при створенні та освоєнні нового покоління мобільного зв'язку 5G.

Певні успіхи з освоєння ММД і використання його для високошвидкісної передачі інформації є. Наприклад за даними компанії ComrTek для безліцензійного міліметрового діапазону найбільш чутливому до опадів діапазоні радіозв'язку 70-80 ГГц протягом весняних і літніх 194 днів (з 19 лютого по 30 серпня) в точному режимі був досліджений канал радіорелейного зв'язку на устаткуванні Siklu 1200 з антенами, діаметром 60 см, на дистанції 2560 метрів і отримані результати за доступністю каналу зв'язку, показані на рисунку 1.1 [6].

При швидкостях передачі до 700 Мбіт/с використовувалася адаптивна квадратурна фазова маніпуляція QPSK, на швидкостях 700 Мбіт/с та 1 Гбіт/с адаптивна квадратурна амплітудна маніпуляція до QAM-64. Досліджувався канал у Бухаресті, що знаходиться в дощовій зоні К, де опади значно інтенсивніші за зону Е, до якої відноситься велика частина території Росії.

При цьому слід враховувати, що опади нерівномірно розподілені протягом року, тому при інтервалі спостереження менше одного року доступність каналу зв'язку, наведена на рисунку 1.1, коливається в кращу та в гіршу сторони.

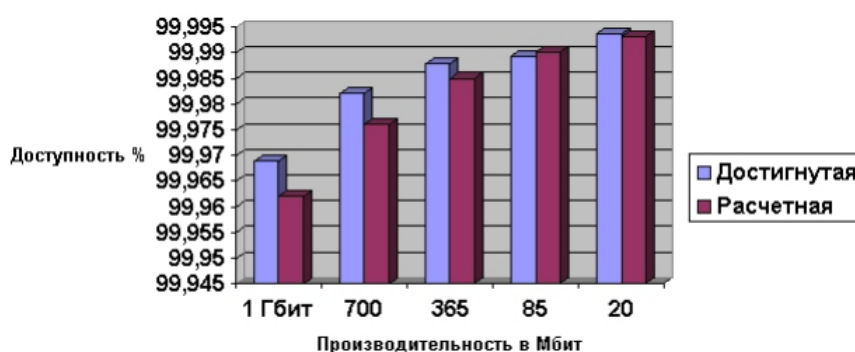


Рисунок 1.1 – Продуктивність каналу 70-80 ГГц (за даними Сомтек)

Російська компанія ЗАТ НВФ "Мікран", що виробляє радіорелейне обладнання ММД, освоїла випуск обладнання Y-PACKET 80 - радіорелейну станцію типу точка-точка для діапазону 71-76/81-86 ГГц (Е смуга частот). Устаткування працює за схемою з частотним дуплексом та пропонує повністю симетричний канал, з підтримкою адаптивної модуляції від QPSK до QAM64 та дозволяє передавати дані на швидкості до 2 Гбіт/с у режимі 64QAM із робочою смугою 500МГц. Устаткування містить повноцінний набір функцій обробки пакетного трафіку Ethernet і підтримує інтерфейси Gigabit Ethernet (оптичні та електричні) [7].

Звичайно стаціонарне радіорелейне обладнання прийшло раніше в міліметровий діапазон, але й у мобільних систем є певні успіхи, які постійно підтверджуються новими розробками апаратури. Так компанія Qualcomm у жовтні 2016 року оголосила про створення мобільного модему Qualcomm Snapdragon X50 5G — першого комерційно доступного модему з підтримкою 5G, здатного підтримувати швидкість з'єднання на рівні 5 Гбіт/с у діапазоні 28 ГГц. Платформа Snapdragon X50 5G складається з модему, прийомопередавача міліметрових хвиль SDR051 і чіпа для керування енергоживленням PMX50 і здатна підтримувати як ширший спектр частот, необхідних стандарту 5G, так і раніше розгорнуті мережі LTE [8].

Те, що розвиток мереж п'ятого покоління не стоїть на місці "Мегафон" продемонструвала на Петербурзькому економічному форумі, показавши на термінальному обладнанні китайської фірми "Huawei" та LTE модифікованому модемі від "Qualcomm" швидкість завантаження даних 1,24 Гбіт/с. А спеціалісти компанії "Samsung" на стаціонарному обладнанні на частоті 28 ГГц отримали влітку 2016 року в польових умовах швидкість обміну інформацією, рівну 7,5 Гбіт/с, що в десятки разів швидше за максимальну швидкість стандарту LTE.

Компанія Ericsson у 2014 році оголосила про проведення успішної серії тестів 5G мережі у частотному діапазоні 15 ГГц. Їм вдалося досягти передачі даних на швидкості 5 Гбіт/с, застосувавши технологію MIMO (Multiple Input Multiple Output), що передбачає передачу та прийом даних по каналу при допомозі кількох антен та просторового кодування, а також використовуючи базові станції та радіомодулі з інтерфейсом нового типу.

Вже з'явилися прототипи 5G-мереж. Першу 5G-мережу запустили у Південній Кореї. Компанія SK Telecom представила нову технологію на відкритті дослідницького центру, а до зимових Олімпійських ігор 2018 р. Південній Кореї компанія планує побудувати мережу 5G по всій країні.

За даними Huawei та Vodafone у 2016 році провели перше польове випробування стандарту 5G (рисунок 1.2) та відкрили лабораторію з дослідження інтернету речей. Вони досягли пікової швидкості передачі даних. Гбіт/сек в діапазоні частот E (від 60 до 90 ГГц) і продемонстрували це в Ньюбері (Велика Британія). Під час цих випробувань тестуванню піддалися однокористувацький (SU-MIMO) і багатокористувацький (MU-MIMO) багатоканальний вхід/вихід, що продемонстрували швидкість 20 Гбіт/сек та 10 Гбіт/сек відповідно.



Рисунок 1.2 – Польова лабораторія фірми Huawei

Головний недолік міліметрових хвиль (ММВ) полягає у сильному ослабленні сигналу при поширенні. Проте аналізуючи відомі методи підвищення ефективності передачі цифрової інформації, можна запропонувати деякі з них для компенсації впливу ослаблення сигналів на передачу інформації у діапазонах ММВ. До таких методів можна віднести наступні:

1. Застосування фазованих антенних ґрат з великим коефіцієнтом посилення.

2. Використання технологій рознесеного прийому.

3. Застосування технології MIMO, коли посиляють та приймають декілька сигналів одночасно.

4. Застосування завадостійкого кодування під час передачі інформації.

Два перші із зазначених методів дають можливість підвищувати енергетичний потенціал на лінії зв'язку міліметрового діапазону за рахунок дуже малих (міліметрових) розмірів антен у цьому діапазоні. Наприклад, компанією Samsung вже розроблена і випробувана фазовані антенні ґрати з 64 антен, розміром близько 6 см^2 , що формує діаграму спрямованості шириною 10° зі зміною напрямку передачі. Випробування, проведені компанією Samsung, підтвердили можливість сталого обміну даними зі швидкістю 1 Гбіт/с на відстані 2 км при прямій видимості та на відстані 200 м на закритих трасах[9].

Методи рознесеного прийому теж можуть зробити значний внесок у підвищення енергопотенціалу. При цьому слід використовувати всі широкі можливості методів, використовуючи різні види надмірності - по частоті, поляризації, часу приходу посилок, паралельної обробки сигналів за технологією MIMO і т.д [10].

Технологія MIMO вже використовується в LTE та WLAN мережах для оптимізації прийому (паралельно відправляється та приймається 2-4 сигнали). Для високих частот застосовується Massive MIMO – технологія оптимізації прийому, коли в мобільних пристроях буде розміщено десятки невеликих антен і сотні – на передавальній базовій станції.

Перешкодостійке кодування інформації енергійно знижує ймовірність помилок при передачі інформації і використовується практично в усіх цифрових телекомунікаційних системах, хоча використання різних видів перешкодостійкого кодування і дещо знижує швидкість передачі інформації за рахунок необхідності передавати надлишкові символи. Однак застосування перешкодостійкого кодування при передачі цифрової інформації дозволяє знизити ймовірність як одиночних, так і групових помилок на кілька порядків, що істотно компенсує ослаблення сигналу діапазонах ММВ.

1.3 Аналіз обмежень на розвиток нового покоління мобільного зв'язку

Хороші умови поширення радіохвиль та досить розвинена елементна база для діапазону частот до 3 ГГц стали головною причиною того, що більшість світових систем комерційного радіозв'язку працює саме у цьому діапазоні частот. Але зі зростанням кількості радіозасобів і трафіку діапазон виявився сильно перевантаженим.

В даний час системи четвертого покоління, включаючи LTE та мобільний WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access – світове співробітництво для високошвидкісного доступу), з метою досягнення спектрального ущільнення, близького до теоретичної межі, використовують велика кількість передових технологій, таких як передача даних за допомогою безлічі приймальних та зраджуючих антен (MIMO), застосування потужних завадостійких кодів, адаптивне підстроювання каналу, мультиплексування ортогональними частотами (OFDM), механізм вибору пріоритету передачі в залежності від якості каналу та ін. Можна відзначити, що можливості ущільнення спектру в діапазоні до 3 ГГц, використовуваному активно для рухомого зв'язку, практично майже вичерпані, а в той же час частоти вище 3 ГГц майже не використовуються.

Робочою групою IEEE 802.16.1 (Радіоінтерфейс для фіксованих мобільних широкосмугових систем доступу для 10–66 ГГц) була розроблена, а потім стандартизована технологія LMDS (локальна багатоточкова розподілена служба зв'язку), що використовує частоти від 28 до 30 ГГц, і призначена для широкосмугового бездротового мовлення. Регулятори спектру ще в 2003 році оголосили, що частотний діапазон E (від 70 до 95 ГГц) стає доступним для високошвидкісного зв'язку, включаючи бездротові локальні мережі типу точка-точка, мобільні мережі та широкосмуговий доступ Інтернет.

Вільні ділянки спектра в діапазоні ММВ є, що створює певну нішу для практичного застосування радіосистем цього діапазону для розвитку ІКТ при освоєнні нового покоління мобільного зв'язку 5G. Але порівняно з частотами до 3 ГГц частоти міліметрового діапазону нині використовуються слабо.

Основні причини цього в сильному загасанні сигналів ММД при поширенні і в недостатньо ще розвиненій елементній базі радіокомпонентів. Однак саме в ММД можна організувати канали передачі інформації з високою пропускнуою здатністю і реалізувати стандарт 5G з швидкостями передачі до 10 Гбіт/с. Тому розглянемо особливості цифровий мобільний зв'язок у міліметровому діапазоні хвиль.

Головною перевагою ММД є можливість використання широкої смуги частот, але є і серйозні недоліки, що стримують розвиток телекомунікацій у цьому діапазоні, а саме:

- сильне згасання міліметрових хвиль при поширенні;
- рівень сигналу, що приймається, істотно залежить від впливу гідрометеорів (краплі дощу, сніг, град, туман) та від присутності в атмосфері твердих неоднорідностей (листя дерев, зграї птахів, пил);
- високий ступінь впливу на рівень сигналу, що приймається;
- наявність зон сильного ослаблення сигналу на деяких частотах через ослаблення сигналів ММД частот молекулами кисню та парами води.

Основні втрати передачі радіохвиль у вільному просторі визначаються виразом

$$b = 20 \lg \left(\frac{4\pi R f}{c} \right) = 92,4 + 20 \lg(R) \quad [\text{дБ}], \quad (1.2)$$

де R - відстань між передавачем та приймачем,

c - швидкість світла,

f – частота несучої.

З виразу 1.2 видно, що в ММД послаблення сигналу у вільному просторі дуже велике і, наприклад, для відстані $r = 1$ км на частоті 37,5 ГГц становить 123,9 дБ, але в частоті 100 ГГц становить 132,4 дБ. При поширенні через атмосферу до загасань сигналу додаються додаткові послаблення через поглинання сигналу молекулами кисню та води, а також через гідрометеори (дощі, сніг, град, туман).

Залежність коефіцієнта поглинання міліметрових хвиль в атмосфері від частоти експериментально отримана та теоретично досліджена в деяких роботах. Наприклад,

для частот до 50 ГГц великі експериментальні дані наведені в роботі, а для частот вище 50 ГГц у роботі. На підставі цих експериментів визначено залежність ослаблення міліметрових хвиль при поширенні в атмосфері Землі, яка показана на рисунку 1.3[11].

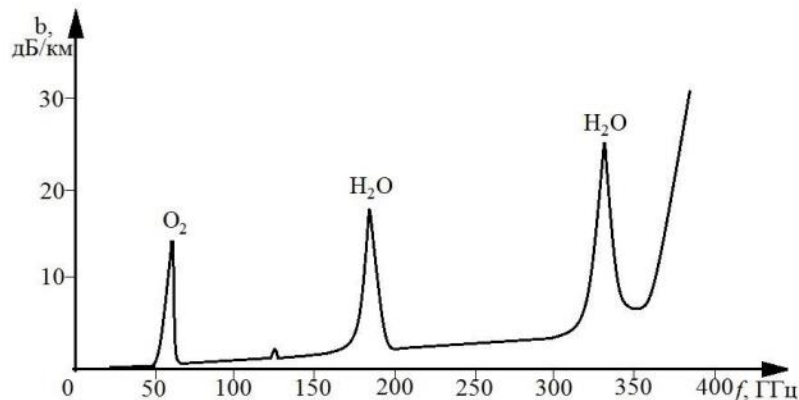


Рисунок 1.3 – Залежність поглинання сигналів ММД киснем і парами води

Аналіз експериментальних даних показує, що мінімальне поглинання хвиль спостерігається у так званих "вікнах прозорості атмосфери" при довжинах ММД 8 мм і 3 мм. Враховуючи сильне поглинання сигналів ММД молекулами кисню та парами води можна визначити ділянки спектру ММД, придатні для високошвидкісної передачі інформації та широкого копільного доступу (ШПД). На рисунку 1.4 показані ділянки спектра з послабленням менше 2 дБ на частотах від 3 ГГц до 56 ГГц та з ослабленням сигналів ММД менше ніж 3дБ на частотах від 200 ГГц до 310 ГГц.

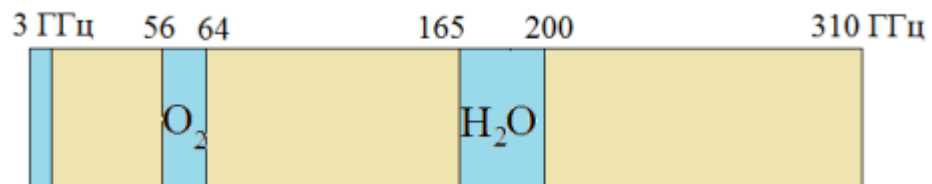


Рисунок 1.4 – Ділянки спектру ММД частот придатні для ШПД

Слід зазначити, що частоти від 27,5 ГГц до 31,3 ГГц зайняті діапазоном LMDC, що ліцензується, і на частотах Е діапазону (від 70 ГГц до 95 ГГц) є ділянки спектра, які за планами ПТП вже розподілені. Але й ділянки спектра з сильним ослабленням сигналу також можна використати.

Наприклад, частота 60 ГГц, на якій ослаблення сигналу велике, використовується в міжсупутниковому зв'язку, так як земні системи не створюють їм перешкод на цій частоті, а супутникові системи не створюють наземних перешкод.

На поширення сигналів ММВ в атмосфері найбільш сильно впливають опади і навіть вікна прозорості атмосфери (довжини хвиль 3 мм і 8 мм) захищають від впливу гідрометеорів. Поглинання енергії сигналу ММВ, що поширюється, кількісно залежить від інтенсивності опадів.

Експериментальні дослідження впливу опадів на хвилі ММД проводилися багатьма дослідниками в різних кліматичних зонах при різноманітних дощових умовах - від мрячих дощів, до проливних ураганних злив.

На підставі численних експериментів, результати яких наводяться на роботах, можна аналітично описати вплив опадів поширення сигналів ММД. Наприклад, у роботі показано, що коефіцієнт поглинання сигналу в ММД лінійно збільшується зі зростанням інтенсивності дощу і його залежність від частоти можна апроксимувати виразом:

$$b_d = \left(\frac{f}{70}\right)^2 \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}}\right], \quad (1.3)$$

де f - частота ГГц, Y - інтенсивність дощу в мм/год.

Експериментально отримані та наведені в роботі залежність ослаблення сигналу ММД від різного рівня опадів, показані на рисунку 1.5.

Ці дослідження, наведені для території з частими дощами, показують, що найбільш відчутний вплив гідрометеорів на поширення сигналів ММД буде на частотах вище 70 ГГц[12].

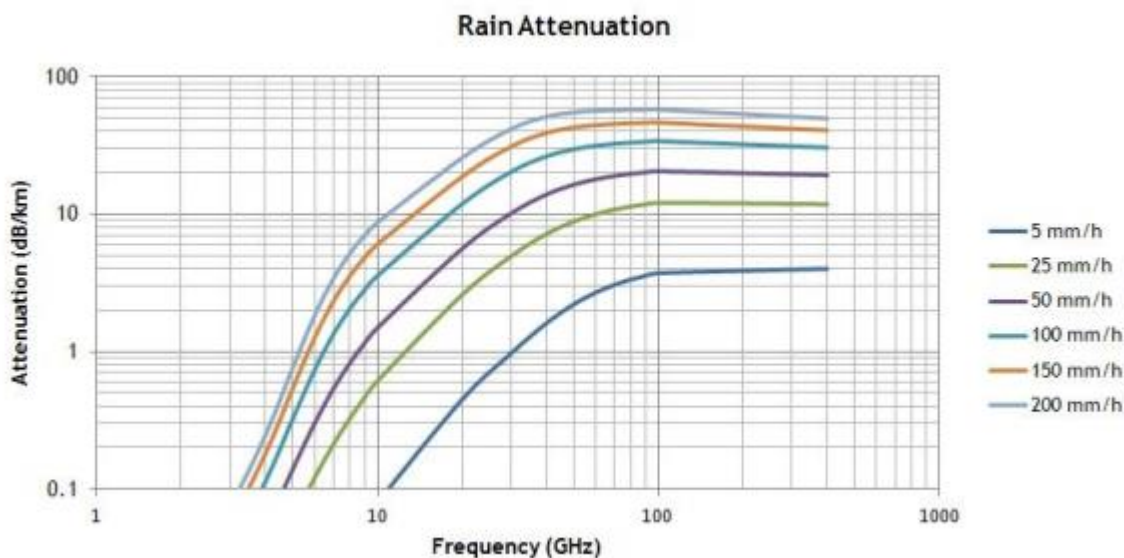


Рисунок 1.5 – Поглинання міліметрових хвиль опадами

Для інтервалів зв'язку протяжністю в 1 км, характерних для стільникового зв'язку в міських районах, запас на поглинання сигналів ММД дощами відповідно до виразу (1.3) для частот до 350 ГГц у середньому становить менше 10 дБ. У сумі з ослабленням у вільному просторі це призводить до ослаблення сигналів ММВ у каналах прямої видимості на трасах зв'язку протяжністю 1 км у вікнах прозорості атмосфери на частоті 37,5 ГГц до 134 дБ та на частоті 100 ГГц до 143 дБ.

Особливістю діапазону ММВ є багатопроменевість. При передачі інформації, навіть при радіовидимості між передавачем і приймачем, на антену приймача крім прямої хвилі приходить цілий ряд інших хвиль, що з'явилися в результаті відбиття від ґрунту, будівель та від інших місцевих предметів. Всі ці хвилі пройшли різний шлях від передавача до приймача і мають різні амплітуди та фази, що безперервно змінюються через зміни обстановки на трасі зв'язку та переміщення абонентів.

Багатопроменевість призводить до випадкових і в загальному випадку нестаціонарних флуктуацій як амплітуди, так і фази сигналу, що приймається, тобто завмирання сигналу. Через наявність перешкод на трасі зв'язку та причини присутності відбитих сигналів, що призводять до багатопроменя, ослаблення сигналів ММД додатково може значно збільшуватися. Хоча методи боротьби із

завмираннями сигналу досить добре працюють, енергетичний запас на завмирання доводиться застосовувати.

1.4 Постановка завдання дослідження

При розробці стандарту нового покоління 5G необхідно розглянути проблему, яка полягає в тому, що, з одного боку, високошвидкісний ШПД можливий тільки в діапазонах гігагерцових частот, а з іншого боку, організація передачі інформації та стільникового зв'язку в ММД зустрічає багато здавалося б непереборних труднощів. До них належить значне ослаблення сигналів міліметрового діапазону при поширенні в атмосфері та при проходженні через перешкоди (стіни будинків, листя дерев та ін), а також вплив на рівень сигналу, що приходить на вхід приймача, випадкових флуктуацій через багатопромєнів і гідрометеорів. Ці причини істотно ускладнюють освоєння ММД для високошвидкісної передачі інформації.

Перехід до покоління 5G і освоєння з цією метою ММД не означає відмови від вже використовуються в мобільному зв'язку діапазонів частот. Велика кількість терміналів Інтернету речей не вимагають високих швидкостей передачі цифрової інформації та має залишитися можливість роботи в мережах 5G обладнання попередніх поколінь стільникового зв'язку. Це означає, що використовувані в мережах 5G радіоканали будуть різними по частотним діапа зонам і мати суттєві характеристики. В свою чергу різноманіття каналів призведе до різноманіття необхідного передачі інформації обладнання.

І якщо діапазон частот до 3ГГц досить докладно вивчений та освоєний, то розробка обладнання для ММД зустрічає багато труднощів, значна частина яких пов'язана з тим, що поки що недостатньо інструментарію для експериментального налагодження пристроїв цього діапазону. Комп'ютерне моделювання через необхідність масштабування призводить до великих помилок, а натурні випробування в реальних каналах вимагають великих витрат по створенню експериментальних трас зв'язку і уповільнюють процеси розробки нових пристроїв покоління 5G.

Виникає протиріччя, що у тому, що з одного боку потрібно швидше освоювати гігагерцовий діапазон, а з іншого боку будь-яка розробка нових пристроїв для роботи в ММД вимагає значного часу. Певну допомогу щодо вирішення такої суперечності може надати розробку та створення імітаційної моделі радіоканалу ММД, що враховує ймовірнісні характеристики заважаючих високошвидкісній передачі інформації факторів, адекватні реальним умовам ММД.

Така модель може допомогти і у визначенні граничних вимог до апаратури покоління 5G, що проектується для роботи в міліметровому діапазоні частот, оскільки дасть можливість не в польових, а в лабораторних умовах випробовувати обладнання, що розробляється в реальному масштабі часу та визначати його характеристики. Створення моделі радіоканалів ММД, адекватної реальним умовам поширення сигналів ММВ мобільного зв'язку, дозволить вирішувати цілу низку практично важливих завдань:

- визначити найкращі види радіосигналів, що забезпечують високу якість передачі інформації;
- в лабораторних умовах експериментально досліджувати різні архітектури побудови пристроїв та систем покоління 5G;
- відпрацьовувати вузли формування та обробки інформаційних сигналів та визначати їх найкращі показники;
- оптимізувати системи та мережі мобільного зв'язку;
- здійснювати контроль якості виробництва нової мобільної апаратури 5G зв'язку покоління.

Створення такого багатофункціонального інструментарію дозволить прискорити процес становлення нового покоління рухомого зв'язку 5G. Метою справжнього дисертаційного дослідження і є аналіз властивостей радіоканалів міліметрового діапазону частот та розробка комплексу для імітації таких радіоканалів.

Для вирішення поставленого завдання потрібно:

- виконати аналіз радіоканалів ММД і визначити основні фактори, що заважають передачі інформації по каналах міліметрового діапазону;

- визначити характеристики та параметри факторів, що заважають передачі інформації по каналах ММД;
- розробити математичну модель каналу ММД;
- запропонувати структуру імітатора радіоканалів ММД;
- розробити методику синтезу імітатора радіоканалів ММД, що здійснює вплив на радіосигнали систем мобільного зв'язку;
- розробити рекомендації щодо вирішення завдань побудови імітатора радіо каналів ММД.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАДІОКАНАЛІВ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

2.1 Ослаблення сигналу під час поширення через канали ММД

Можливості передачі у ММД частот, як впливає з рис. 1.3 та рис. 1.4 значно розрізняються. Наприклад, у діапазоні частот 60 ± 3 ГГц спостерігається ослаблення сигналу на 15 ДБ/км через поглинання міліметрових хвиль молекулами кисню, а в діапазоні частот 182 ± 18 ГГц сигнал послаблюється на десятки децибелів залежно від кількості водяної пари в атмосфері. Тому ці діапазони частот для високошвидкісної передачі інформації системами рухомого зв'язку не підходять [13].

Діапазон частот від 3 до 57 ГГц підходить для покоління 5G, проте він частково вже зайнятий різними службами і активно використовується в супутниковому зв'язку. Є й інші частоти ММД, які не підходять для 5G, так як було виділено МЕС для різних служб. До них відносяться діапазони частот від 28,35 до 29,1 ГГц; 76-81 ГГц; 86-92 ГГц; 94-94,1 ГГц. Але тим не менш у частотному діапазоні від 71 до 95 ГГц сумарний інтервал не зайнятих частот становить більше 12 ГГц, що дозволяє використовувати широкосмугові системи зв'язку покоління 5G без негативного впливу на інші радіосистеми ММВ.

Закономірності поширення радіохвиль сантиметрового діапазону і ММД багато в чому збігаються, але деякі явища, пов'язані з поглинанням хвиль ММД, якісно відрізняються від явищ, що спостерігаються на більш довгі хвилі. На умови розповсюдження хвиль ММД майже не впливає зміна доби та сезонів року, але послаблення сигналу при поширенні, що виникають з інших причин, створюють проблеми для швидкого освоєння діапазону.

При поширенні сигналів ММД, крім значного ослаблення рівня сигналу, що з'являється у відповідність до виразів (1.2) і (1.3), виникають і додаткові послаблення сигналу через цілу низку причин, що виникають на трасі зв'язку.

Мобільна радіостанція оточена великою кількістю відбиваючих предметів з різним розташуванням та різноманітними відбивають властивостями, тому сумарний сигнал у точці прийому утворюється багатьма променями, що пройшли різним шляхом. Це характерно і для базової станції стільникової мережі та для кореспондента станції при роботі абонентів за методом "крапка-крапка". На рисунку 2.1 показані можливі шляхи проходження радіохвиль зв'язку абонента з базовою станцією.

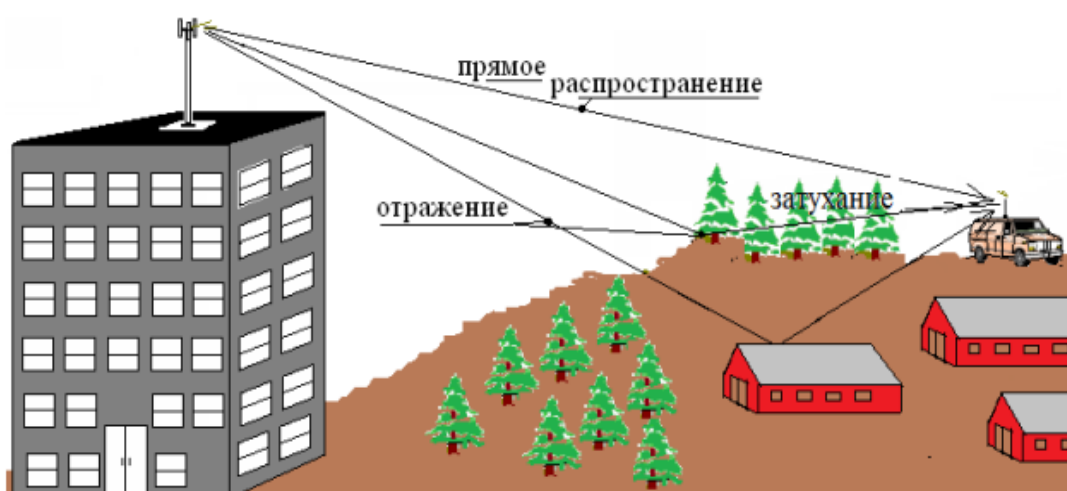


Рисунок 2.1 – Багатопроменеве поширення радіохвиль

Сукупна дія безлічі променів, що приходять на антену приймача, викликає появу коливань амплітуди і фази прийнятого сигналу (замирань сигналів) порівняно з поширенням сигналу у вільному просторі. У рухомому зв'язку замирання сигналу відбуваються і при змінах взаємного напрямку антен.

Додаткові ослаблення виникають під час проходження сигналів ММД через стіни будівель. Якщо низькочастотні сигнали порівняно легко проходять через такі перешкоди, то сигнали ММД сильно слабшають твердих матеріалах та на частотах вище 30 ГГц практично не можуть пройти через типові по товщині бетонні та цегляні стіни будівель. Однак частіше всього багатий зв'язок не переривається, так як сигнали ММД потрапляють у будівлі через віконні отвори і двері, послаблюючи при цьому не дуже значуще [14].

Крім сильного ослаблення сигналів ММД при поширенні через канали зв'язку спостерігаються і доплерівські зміни частоти під час руху абонентів щодо один одного.

Узагальнюючи вищевикладене, можна визначити причини можливого ослаблення сигналів у радіоканалах ММД наступним чином:

- ослаблення радіохвиль у вільному просторі;
- додаткове ослаблення радіохвиль при поширенні в газах атмосфери;
- втрати енергії радіохвиль при поширенні через дощі та інші гід рометеорів;
- завмирання сигналів ММД через багатопроменеві;
- флуктуації сигналів у рухомих абонентів через зміни взаємного розташування антен у передавальній та приймальній станції;
- загасання сигналу ММД під час поширення через листя дерев;
- ослаблення сигналів при проходженні через щільні перешкоди, що загороджують, наприклад стіни будівель.

При імітації радіоканалів ММД необхідно знайти математичний опис послаблень сигналів через вплив на поширюється по радіоканалу сигнал перерахованих факторів. Для мобільного зв'язку потрібно оцінити і доплерівські впливи на зміну параметрів сигналу.

2.2. Модель замирань сигналу в каналах ММД

Розглянемо причини, що викликає завмирання сигналу. Прийнятий сигнал на антені приймача формується в результаті інтерференції радіохвиль, що надходять по різних шляхах поширення, як показано на рисунку 2.1. Кожна хвиля, що приходить, характеризується своєю амплітудою, часом поширення, фазовим зрушенням при відображенні і доплерівським сдвигом частоти. При зміні умов поширення, властивостей відбивачів, кутів падіння на поверхню, що підстилає, положення приймача і відбивачів змінюються параметри інтерферуючих сигналів, і, відповідно, змінюється амплітуда та фаза сумарного сигналу.

При цьому слід враховувати, що зміни параметрів каналу є випадковими і залежать від безлічі причин, тому інтерференційна картина стає змінюється у часі, тобто нестационарною. Це спостерігається навіть якщо абонент нерухомий або переміщається повільно, а якщо він рухається швидко, то замирання стають сильнішими вираженими.

Залежно від швидкості руху абонента властивості радіоканалу змінюються і за аналогією з теорією радіорелейного зв'язку можна визначити часові інтервали, на яких властивості каналу змінюються незначно, тобто визначити інтервали локальної стаціонарності замирань.

У радіорелейному радіозв'язку в залежності від швидкості зміни рівня прийнятого сигналу замирання прийнято поділяти на два види - швидкі замирання та повільні замирання.

Швидкі замирання виникають через зміну взаємних амплітудних і фазових співвідношень сигналів, що прийшли по різних шляхах розповсюдження (рис. 2.1), і часто їх називають інтерференційними замираннями.

Повільні замирання визначаються загальними змінами властивостей каналу поширення сигналу при зміні властивостей середовища розповсюдження (наприклад, поява пилу в атмосфері або зміна властивостей поверхні, що підстилає після дощу). Такі процеси відбуваються порівняно рідко і повільно, тому повільні замирання в ММД можна розглядати, як не регулярне зміна середнього рівня (медіани) прийнятого сигналу, що змінюється по випадковому процесу через швидкі замирання.

Загальноприйнятою моделлю повільних замирань є модель, що описується логарифмічно-нормальним законом ймовірностей. Функція щільності ймовірності розподілу середнього рівня випадкового процесу повільних замирань при логарифмічно-нормальному розподілі x визначиться виразом:

$$\omega(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_M x} \left[-\frac{(\ln x - m_M)^2}{2\sigma_M^2} \right], \quad (2.1)$$

де σ_M , m_M – параметри розподілу.

Функція щільності розподілу ймовірностей (2.1) визначена двома параметрами - медіанним значенням m_M та стандартним відхиленням σ_M .

Повільні завмирання сигналу ММД можуть досягати одиниць децибел, але відчутний вплив їх на сигнал, що приймається, виникає тільки при великих за тривалістю сеансах зв'язку. Проте запас енергетики на подолання цих замирань доводиться враховувати.

Добовий хід рівня сигналу та його сезонні коливання в ММД практично мало помітні, так як передача сигналу йде через обмежений і малий обсяг атмосфери, властивості якого майже не залежать від часу доби сезону року.

Швидкі завмирання у ММД визначаються багатопроменевим характером поширення сигналу, а також варіаціями кута приходу радіохвиль при переміщенні антен мобільних абонентів. Оскільки взаємні фазові зрушення інтерферуючих компонентів випадкові, коливання передавальної функції каналу зв'язку і рівня прийнятого сигналу за рахунок швидких ран ран теж випадковий процес.

Фізичною причиною швидких замирань є інтерференція в приймальній антені безлічі хвиль з довільними амплітудами та випадковими фазами, що приходять до приймача різними шляхами поширення від передавача. Ці шляхи поширення містять як найкоротший прямий шлях, при наявній радіобачності між передавачем і приймачем, і кілька більш протяжних шляхів з допомогою відображення сигналу, що поширюється, від підстилаючої поверхні і від місцевих предметів.

Для створення математичної моделі каналу ММД необхідно визначити ймовірнісні та спектральні властивості таких замирань, а також залежність їх параметрів від параметрів трас зв'язку. З цією метою розглянемо інтерференцію хвиль, що з'єднують двох абонентів, що знаходяться на відстані R один від одного, як показано на рисунку 2.2.

Така двопротенева модель поширення радіохвиль найпростішою моделлю поширення радіохвиль над рівнинами у сільській місцевості та вздовж автомобільних доріг. Вона досить точно описує поширення сигналу, коли є прямий шлях між передавачем і приймачем і лише один відбитий. При цьому відбита хвиля зазвичай

виникає при відображенні радіохвилі від поверхні, що підстилає, тобто від землі. Точку відображення можна знайти з рівності кутів ковзання між дотичною до профілю в точці відображення та прямими лініями, проведеними з цієї точки до антен абонентів.

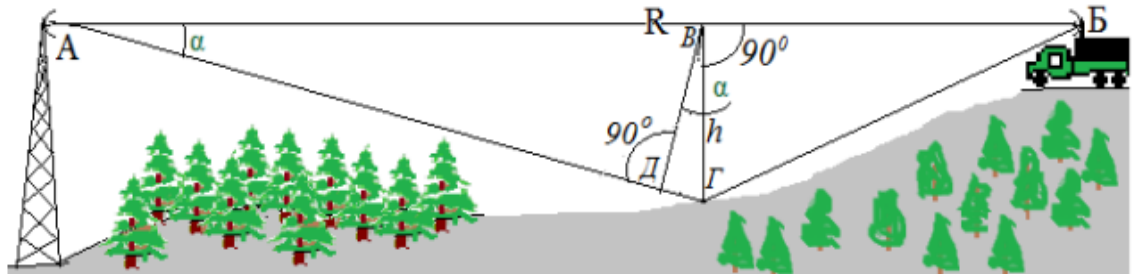


Рисунок 2.2 – Інтервал рухомого зв'язку

Методика розрахунку множника ослаблення сигналу на трасах прямою радіобачністю між абонентами, тобто на відкритих трасах, досить докладно викладено у роботах, але частота і тривалість завмирань, що виникають через інтерференцію променів, вимагає пояснення. Розглянемо це з урахуванням моделі траси, показаної рисунку 2.2 [15].

Радіосигнал від базової станції до мобільного абонента йде двома шляхам - найкоротшому АБ та довшому АГБ. Максимальна відстань між променями h , а різницю ходу сигналів цими шляхами поширення визначимо як $\Delta R = AB - (AG + BG) = DГ$.

Так як $tg\alpha = \frac{h}{R/2} = \frac{2h}{R}$, та одночасно $tg\alpha = \frac{DГ}{DБ} \approx \frac{DГ}{h}$, то

$$\Delta R = DГ = \frac{2h^2}{R}. \quad (2.2)$$

Різниця фаз між променями у точці прийому визначиться як набіг фаз при поширенні сигналу з цих променів:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{4\pi h^2}{\Delta R} = \frac{4\pi h^2 f}{RC}, \quad (2.3)$$

де λ - довжина робочої хвилі абонентів, f - робоча частота, C - швидкість радіохвилі.

Оскільки відстань h при сотовому зв'язку в діапазоні ММВ порівняно з R невелика, то кут α малий та

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2h}{R} \cong \alpha, \quad h = \frac{R\alpha}{2}, \quad (2.4)$$

то тривалість замирань можна визначити як величину, обернену швидкості затухань:

$$\tau = \frac{dt}{d\varphi} = \frac{2\lambda dt}{\pi\alpha^2 dr}. \quad (2.5)$$

З виразу (2.5) випливає, що зі зменшенням довжини хвилі та зростанням інтервалу зв'язку R частота замирань зростає, які тривалість зменшується. З ростом відстані h між променями розповсюдження сигналів зростає кут α , і частота замирань збільшується, а тривалість замирань сумарного сигналу зменшується за квадратичним законом.

Так як у точці прийому інтерферує часто не дві, а кілька відображених місцевими предметами хвиль, то швидкість швидких замирань змінюється в часі за випадковим законом, параметри якого залежать від характеру конкретної траси зв'язку і від кількості відбивають сигнал місцевих предметів.

Передаточну функцію радіоканалу можна визначити прямим перетворенням Фур'є від комплексної імпульсної характеристики радіоканалу $h(\tau)$

$$H(f, R_i, \{D\}) = \int_0^\infty h(\tau) e^{j2\pi\tau} d\tau, \quad \text{при } -\infty < f < \infty.$$

У цьому випадку сума синфазної та квадратурної гаусівських компонентів приймаючого сигналу визначиться як:

$$H(f, R_k, \{D_i\}) = H e^{i\varphi} = \sum_{i=1}^K H_i \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^K H_i \sin \varphi_i = X + jY, \quad (2.6)$$

де, f - частота радіосигналу;

R_k – довжина шляху k – го променя поширення сигналу від антени передавача до антени приймача;

$\{D_i\}$ - властивості i – го перевипромінювача;

K – кількість перевипромінювачів;

H_i, φ_i - модуль і аргумент передавальної функції i - го променя поширення.

Для математичного опису швидких завмирань сигналу, викликаних інтерференцією сигналів різних променів поширення, використовуються різні особисті випадкові процеси, серед яких найбільшою універсальністю має чотирипараметричну модель розподілу щільностей ймовірностей [36-38]. І для імітації радіоканалів мобільного радіозв'язку застосовно до міських умов з великою кількістю перевипромінювачів основу математичної моделі можна вибрати чотирипараметричний закон розподілу ймовірностей передавальної функції каналу з щільностями ймовірностей модуля передавальної функції:

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp \left(-\frac{H^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_x^2 \sigma_y^2 + m_y^2 \sigma_x^2}{2\sigma_x^2 \sigma_y^2} \right). \quad (2.7)$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} \cdot \sum_{S=0}^{\infty} \frac{(2k + 2S - 1)! (\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^k m_y^{2S} \sigma_x^{2S}}{k! (2S)! 2^k (\sigma_y^{2k+4S} m_x^{k+S})} H^{k+S} I_{k+S} \left(\frac{m_x}{\sigma_x^2} H \right), \quad (2.8)$$

та фази

$$w(H\varphi) = \frac{\sigma_x \sigma_y \exp \left(\frac{m_x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{m_y^2}{2\sigma_y^2} \right)}{2\pi (\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi)} [1 + L [1 + \Phi(\sqrt{2}L)] \sqrt{\pi} \exp(L^2)], \quad (2.9)$$

$$\text{при } L = \frac{m_x \sigma_y^2 \cos \varphi + m_y \sigma_x^2 \sin \varphi}{\sigma_x \sigma_y \sqrt{(\sigma_y^2 \cos^2 \varphi + \sigma_x^2 \sin^2 \varphi)}},$$

де H – модуль передавальної функції каналу зв'язку;

$I_{k+S}(z)$ - модифікована функція Бесселя порядку $k+s$;

$\sigma_x, m_x, m_y, \sigma_y$ - параметри чотирипараметричного розподілу;

$\Phi(\cdot)$ – інтеграл ймовірності.

Чотирипараметрична модель передавальної функції каналу зв'язку включає в себе багато окремих випадків розподілів, що часто спостерігаються у різних умовах радіозв'язку, та за різних умов вираз (9) стає простішим, що стає при $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ у релеевському розподілі

$$w(H) = \frac{H}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.10)$$

А при σ_x або σ_y рівних нулю в пересічно-нормальному розподілі

$$w(H) = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sigma_{x,y}\sqrt{\pi}}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{x,y}^2}\right) \quad (2.11)$$

Якщо $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, а $m_y \neq 0$, то вираз (2.11) перетворюється в узагальнений релеевський розподіл ймовірностей

$$w(H) = \frac{H}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{H^2 + m_x^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(m_x \frac{H}{\sigma^2}\right), \quad (2.12)$$

де I_0 – модифікована функція Бесселя нульового порядку з моментами

$$m_k = (2\sigma^2)^{2/k} \Gamma\left(1 + \frac{k}{2}\right) F_1\left(-\frac{k}{2}; 1; \frac{m_y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.13)$$

де Γ – гамма функція.

Або при $m_x = m_y = 0$ вираз (2.13) перетворюється в доплерівський розподіл

$$w(H) = \frac{H}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{H^2}{4}\right) \frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2} \Big) I_0 \left[\frac{H^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right], \quad (2.14)$$

з першим моментом виду

$$m_1 = \sqrt{\frac{\pi \sigma_x \sigma_y}{2} P_{1/2} \left[\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2 \sigma_x \sigma_y} \right]}, \quad (2.15)$$

де $P_{1/2}$ - функція Лежандра першого роду, та другим моментом виду

$$m_2 = 4i \sqrt{\frac{\sigma_x^3 \sigma_y^3}{\pi \sigma_x^2 - \sigma_y^2} Q_{-1/2}^{3/2} \left[\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \right]}, \quad (2.16)$$

де $Q_{-1/2}^{3/2}$ - приєднана функція Лежандра другого роду.

В рамках цієї моделі, що визначається виразами (2.9)-(2.16), коливання рівня і фази сигналу, що приймається системою, аналогічні проходженню сигналу через чотириполіусник з комплексним коефіцієнтом передачі, випадкові зміни якого описуються чотирипараметричним законом розподілу. Ортогональні компоненти такого комплексного коефіцієнта передачі є випадковими процесами, що описуються двома гаусовими розподілами з різними дисперсіями та середніми (m_c , m_s , σ_c , σ_s). Залежно від конкретних значень величин цих параметрів і виходять різні приватні види розподілів.

Проте радіоканали мобільного зв'язку ММД має свої особливості, однією з яких є необхідність роботи систем з гостронаправленими антенами для компенсації сильного згасання сигналів ММВ при поширенні. Тому через вузькість діаграм спрямованості антен по рухомій системі зв'язку на приймач може надходити тільки кілька променів поширюється сигналу, що дозволяє від складної чотирипараметричної моделі каналу рухомого зв'язку, що описується виразами (2.9)

та (2.10), перейти до інженерної моделі, що використовується зазвичай при розрахунках систем зв'язку.

Для моделювання багатопроменевого поширення у присутності прямий радіовидимості між абонентами зазвичай використовується розподіл Релея, у великому відсотку часу (більше 60%) узгоджується з експериментальними даними. Його щільність розподілу ймовірностей описується виразом (2.11).

Для математичного опису каналу прямої радіовидимості з прямим променем і декількома променями, що з'являються через відображення від підстилаючої поверхні і місцевих предметів, часто використовують розподіл Райса [16].

$$\omega(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp(-A) I_0\left(\frac{x}{\sigma} \sqrt{2A}\right), \quad (2.17)$$

де A – відношення потужності регулярної складової рівня корисного сигналу до флюктууючої складової.

У цифровому зв'язку наявність глибоких та тривалих швидких завмирань викликає поява пакетів помилок, виправлення яких утруднено. Тому для опису радіоканалу ММД потрібно визначити імовірнісні та спектральні властивості цих замирань і залежність їх характеристик від параметрів трас та систем зв'язку.

Для визначення тривалості таких замирань використовують коефіцієнт кореляції огибаючої, що характеризує взаємозв'язок змін рівня сигналу в різні моменти часу на різних частотах

$$\rho(\Delta t, \Delta f) = \frac{\overline{(s_1 s_2)} - \overline{s_1} \overline{s_2}}{\sqrt{\left[\overline{(s_1^2)} - \overline{(s_1)}^2\right] \left[\overline{(s_2^2)} - \overline{(s_2)}^2\right]}}, \quad (2.18)$$

де s_1, s_2 – амплітуди сигналів на віддалених одна від одної частотах на величину Δf і віддалених один від одного за часом на Δt .

У виразі (19) характеристика означає усереднення ансамблю. Для абонента мобільної станції, що рухається, в ряді робіт пропонується апроксимація для коефіцієнта кореляції

$$\rho(\Delta t, \Delta f) = \frac{I_0\left(\frac{2\pi V \Delta t}{\lambda}\right)}{1 + (2\pi \Delta f)^2 T_m^2}, \quad (2.19)$$

де I_0 - функція Бесселя першого роду нульового порядку;

V – швидкість переміщення абонента;

T_m – середньоквадратичне відхилення часу приходу сигналу з різних променів щодо їхнього середнього часу приходу.

Вирази для коефіцієнта кореляції (2.18) та (2.19) визначають також інтервал частотної кореляції замирань RF, тобто. рознесення частот, на якому коливання рівня сигналів можуть вважатися некорельованими. Якщо смуга частот спектра сигналу більша, ніж RF, то замирання з гладких, коли всі частотні компоненти спектру інформаційного сигналу замирають одночасно, перетворюються на селективно-частотні, коли особисті частотні складові сигналу замирають не одночасно. Це еквівалентно проходженню сигналу через лінійний ланцюг з нерівномірною частотною характеристикою, причому форма частотної характеристики безперервно змінюється.

Тривалість T_3 швидких замирань щодо деякого середнього рівня $T_0 \cong \tau$ може бути апроксимована виразом. При русі абонентів зв'язку середня частота замирань може становити одиниці герц, що істотно впливає достовірність передачі інформації, оскільки може призводити до пакетів помилок.

У ММД повинні використовуватися досить широкопasmові інформаційні сигнали і багатопроменева може призводити і до селективно частотних замирань (СВЗ). Основною причиною СПЗ є тимчасове розсіяння приходу різних променів, внаслідок багатопроменевого розповсюдження. Різниці фаз між компонентами однієї і тієї ж частоти, що розповсюджуються по різних шляхах, можуть виявитися

некорельованими для різних частот спектра, при цьому одні частотні складові посилюються, інші слабшають.

З виразу (20) при $\Delta t=0$ випливає

$$\rho(\Delta f) = \frac{1}{1 + (2\pi\Delta f)T_m^2}. \quad (2.20)$$

Припустимо, що рівень кореляції між різними частотними складовими дорівнює 0,5, тоді інтервал частотної кореляції дорівнюватиме $R_F=1/(2\pi T_m)$. На реальних трасах рухомого зв'язку значення T_m може змінюватися в широких межах, від сотих часток мікросекунди до десятків мікро секунд [35]. Тому значення інтервалу частотної кореляції може приймати будь-які значення від одиниць кілогерц до десятків мегагерц.

СЧЗ і багатопроменевість у ММД призводять до розтягуванню за часом прийнятих символів, що викликає міжсимвольну інтерференцію (МСІ). Відстань по частотній осі між прямими та зворотними каналами в міліметровому діапазоні може значно перевищувати інтервал частотної кореляції, при цьому канал дуплексного зв'язку виявляється асиметричним, що ускладнює адаптивне управління системами зв'язку мобільних та базових станцій зворотним каналом.

У радіоканалах покоління сотового зв'язку 5G можуть спостерігатися і тимчасові завмирання. Їх основною причиною є доплерівська зміна частоти під час руху абонентів зв'язку щодо один одного. Якщо мобільна станція переміщається, то через доплерівський зсув частоти сигнал зазнає спотворення, що приводять аналогічно багатопроменя до МСІ, негативно впливає на якість передачі цифрової інформації через можливе збільшення ймовірності помилок.

При наближенні абонентів зв'язку, зміна частоти визначиться виразом

$$f = f_0 \left(\frac{1 + \frac{U}{C}}{1 - \frac{U}{C}} \right) = f_0 \left(\frac{C + U}{C - U} \right), \quad (2.21)$$

де f_0 - несуча частота системи зв'язку,

U, V - швидкості руху приймача та передавача щодо один одного,

C - швидкість поширення радіохвиль.

При видаленні абонентів один від одного доплерівська зміна частоти визначається виразом

$$f = f_0 \left(\frac{1 - \frac{U}{C}}{1 + \frac{V}{C}} \right) = f_0 \left(\frac{C - U}{C + V} \right). \quad (2.22)$$

Наприклад, для автомобілів, що рухаються назустріч один одному, зі швидкістю кожного 90 км/год доплерівська частота f_D , при робочій частоті автомобільних радіостанцій у 100 ГГц, складе $f_D = 16,7$ кГц.

Величина доплерівського зсуву частот різна для різних кутів прийому α , як показано на рисунку 2.3.

Такий ефект називають дисперсією частоти або доплерівським розкидом і залежить він від величини кута прибуття радіохвилі α . Через доплерівський ефект спектр переданого сигналу піддається розширенню частоти протягом передачі інформації, який також залежить від кута приходу хвилі.

$$f_{D \text{ макс}} = f_D \cos \alpha \quad (2.23)$$

Максимальна (або мінімальна при русі у зворотному напрямку) доплерівська частота досягається при $\alpha_n = 0$ ($\alpha_n = \pi$), як впливає з виразу (2.23).

Багатопроменеве поширення у зв'язку з рухом приймача або передавача призводить до різких змін властивостей радіоканалу, що у свою чергу викликає глибокі та випадкові флуктуації прийнятого сигналу. Завмирання сигналу до десятка децибел нижче за середній рівень прийнятого сигналу можуть відбуватися кілька разів на секунду, залежно від швидкості переміщення мобільної станції.

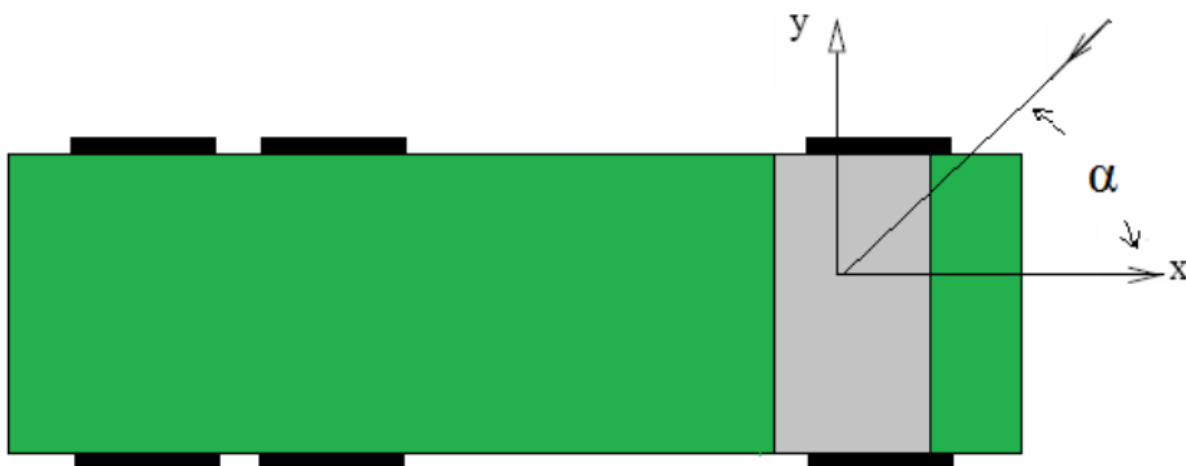


Рисунок 2.3 – Кут прибуття радіохвилі – α

У міській зоні мобільного зв'язку спостерігається затінення прямої траси між базовою та мобільною станціями та стільниковий зв'язок у ММД здається неможливою через загасання радіохвиль у стінах будівель та інших перешкод. Однак при цьому навколо абонентів мережі 5G є велике число відбивачів сигналу, обумовлене різноманітністю міських об'єктів. Ці відбивачі створюють додаткові шляхи між передавачем і приймачем, що дозволять оптимістично дивитися на можливості стільникового зв'язку ММД хвиль. Але слід пам'ятати, що багатопроменевість призводить до МСІ і за запобіганням сигналу, хоча рівень будь-якого відбитого сигналу завжди менше рівня сигналу прямої радіовидимості.

2.3 Послаблення ММВ під час поширення в атмосфері

Крім змін рівня та спектра сигналу через швидкі, повільні та селективно-частотних замирань, а також впливу доплерівського розсіювання, сигнал, що розповсюджується по каналу зв'язку, додатково послаблюється з-за цілого ряду причин. Найбільший внесок у ослаблення сигналу ММВ при поширення вносить загасання у вільному просторі, величина якого визначається виразом (2.2) і залежить від відстані між абонентами та робочої частоти системи зв'язку. Але навіть у спокійній та чистій атмосфері сигнал, що поширюється теж значно послаблюється.

Приземний шар атмосфери дуже мінливий у часі і за простір через вплив мінливих через погоду параметрів підстилаючої поверхні та турбулентності повітря. Розрізняють резонансне і нерезонансне ослаблення сигналів ММВ атмосферою. Резонансне поглинання відбувається в молекулах кисню та води. Це пов'язано з тим, що за законами квантової теорії кожна речовина може поглинати тільки певний, свій власний набір квантів енергії чи групи частот.

У ММД найбільш значне поглинання викликають кисень і молекули води чистої атмосфери. Дослідженню цих питань було присвячено безліч наукових праць, наприклад, оскільки в супутниковій зв'язку і в радіолокації радіосигнали проходять в атмосфері великі відстані та загасанням сигналів в атмосфері не можна нехтувати.

Аналітично описати поглинання ММВ у атмосфері, особливо у її нестационарному турбулентному приземному шарі, коректно не вдається, тому різними науковими колективами були виконані масштабні експериментальні дослідження, на підставі яких у журналі наведено узагальнюючий графік, що ілюструє залежність загасання в приземному шар атмосфері від частоти. На цьому графіку, наведеному на рисунку 2.4, виділяються піки, зумовлені резонансним поглинанням молекулами ММВ кисню та парами води [17].

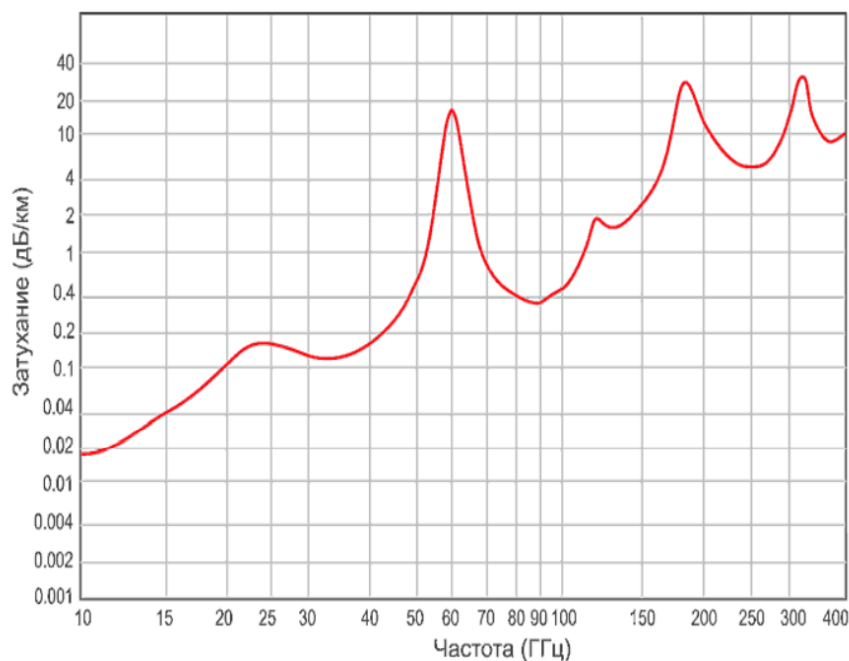


Рисунок 2.4 – Згасання міліметрових хвиль у газах атмосфери

У таблиці 2.1 наведено параметри піків резонансного поглинання киснем та водою і можна відзначити, що значне ослаблення ММВ спостерігається лише близько частот 60, 183 та 320 ГГц, а на частотах аж до 110 ГГц не перевищують 1 дБ/км.

Узагальнюючи викладене вище можна зробити висновок, що інтенсивне поглинання відбувається на хвилях 2,5 мм та 5 мм для кисню та на хвилях 1,8 мм та 13,5 мм для водяної пари. У вуглекислому газі, озоні, метані сильне поглинання міліметрових радіохвиль при дослідженнях не спостерігається.

Аналіз експериментальних даних по поширенню ММВ показує, що в діапазоні довжин хвиль від 1 мм до 10 мм є чотири «Вікна» щодо слабкого поглинання, а саме: в області 1,2 мм ($\delta = 0,7$ дБ/км), в області 2 мм ($\delta = 0,3$ дБ/км), в області 3 мм ($\delta = 0,22$ дБ/км) та в області 8,6 мм з поглинанням 0,07 дБ/км.

Таблиця 2.1 – Параметри піків резонансного поглинання

Частота, ГГц	Поглинання, дБ/км	
	O ₂	H ₂ O
22		0,2
60	18	
120	2	
183		23
320		25

Можна відзначити, що в діапазонах частот 28-40 ГГц і 80-100 ГГц загасання змінюється мало, становлячи в першому випадку в середньому 0,15 дБ/км і 0,4 дБ/км у другому.

Вплив на умови поширення ММВ пір року через розсіювання сигналів в атмосфері проявляється тільки в тому, що на трасах, розташованих у північній півкулі, рівень сигналу в літні місяці вищий, ніж у зимові. У середніх широтах сезонні зміни середнього рівня сигналу досягають 10 - 12 дБ, тому при розрахунках радіоліній ММД хвиль це необхідно враховувати.

2.4 Ослаблення сигналів ММД у дощах, снігу, серпанку, пилу

Поглинання радіохвиль у гідрометеорах експериментально досліджувалося у різних кліматичних зонах. Дослідники вказують на двічі особисті фізичні причини поглинання сигналів ММД у дощах. Одна з причин це розсіювання енергії через відображення сигналів від крапельних утворень, оскільки діелектрична проникність води приблизно в десятки разів перевищує діелектричну проникність навколишнього повітря та є межі розділу середовищ, що динамічно змінюються.

Інша причина поглинання визначається тим, що кожную краплю можна розглядати як напівпровідник, в якому радіохвиля, що поширюється, наводить струми зсуву. Щільність цих струмів значна і пропорційна частоті, тому значні струми виникають саме на найвищих частотах ММД. Виникаючі в краплях води втрати енергії і є причиною поглинання радіохвиль. Ослаблення сигналу, що розповсюджується, ММД при цьому зростає зі збільшенням інтенсивності опадів та розмірів крапель, що наближаються до довжини хвилі ММД.

Узагальнені результати експериментальних досліджень наведено на рисунку 2.5, з якого випливає, що практично у всьому діапазоні ММВ спостерігається лінійна залежність між коефіцієнтом поглинання та інтенсивністю дощу. Залежність поглинання сигналів ММД у дощах від частоти в роботі апроксимована виразом, яке для злив з інтенсивністю 100 мм/год для ММД 30-100 ГГц добре узгоджується з експериментальними результатами інших дослідників, отриманими компанією ComPTek у каналі ММД у Бухаресті [18].

Експерименти проводилися на обладнанні ММД типу Siklu 1200 з 60 сантиметровими антенами, показаному на рисунку 2.5. Один дуплексний інтервал передачі високошвидкісної інформації був організований на дистанції 2560 метрів і безперервно функціонував 194 дні.

Рекомендації МЕС (Rec. ITU-R PN.837-1) залежно від ймовірності та інтенсивності опадів поділяють нашу планету на 15 регіонів. Бухарест знаходиться в дощовій зоні Н, де опади суттєво інтенсивніші ніж у зоні Е.

Дощові зони відображають ймовірність опадів різної інтенсивності та їх тривалість. Для порівняння наведемо в таблиці значення інтенсивності опадів у типовій зоні Е і в кількох інших зонах, у тому числі в зоні Н, для якої на рисунку 2.5 наведено експериментальні залежності поглинання ММВ дощами.

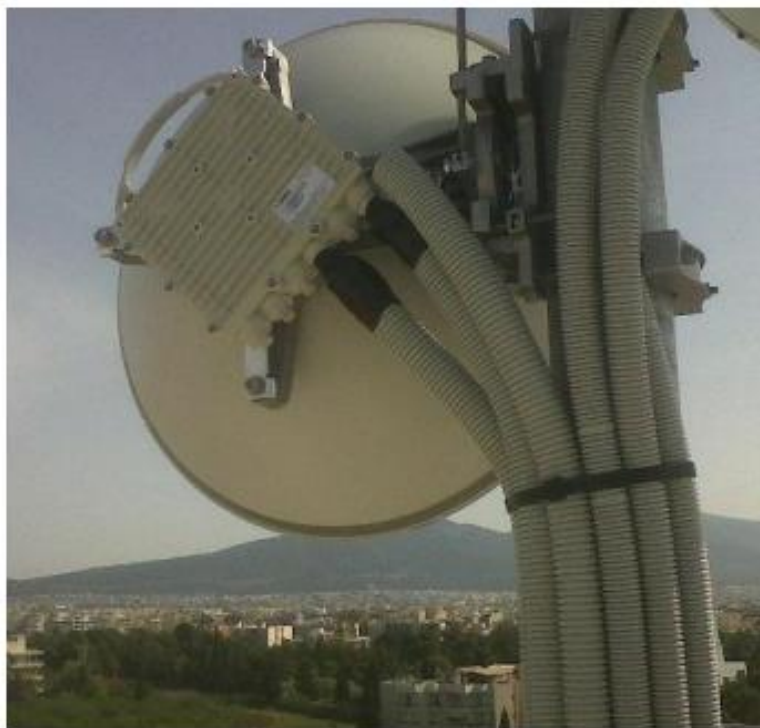


Рисунок 2.5 – Siklu 1200 у Бухаресті

Таблиця 2.2 – Інтенсивність опадів в дощових зонах

Відсоток пори року	Інтенсивність опадів в дощових зонах			
	Е	Ф	Н	К
1	0,6	1,7	2	1,5
0,3	2,4	4,5	4	4,2
0,1	6	8	10	12
0,03	12	15	18	23
0,01	22	28	32	42
0,003	41	54	55	70
0,001	70	78	83	100

Практика використання радіорелейного обладнання міліметрового діапазону показала, що поглинанням ММВ в умовах серпанку та пилу можна знехтувати, оскільки розміри частинок пилу істотно менші за 1 мм та їх поверхня, що відбиває, мала.

Поглинання ММВ у снігу залежить від щільності снігу та його вологості. Експериментальні дані з ослаблення ММВ у снігу, виміряні на частоті 35 ГГц наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Експериментальні дані з ослаблення ММВ у снігу

Тип снігу	Щільність снігу, г/м ³	Вміст води, г/м ³	Погонне ослаблення, дБ/км
Сухий	0,08	0,006	0,05
Слабо вологий	0,09	0,008	0,5
Вологий	0,1	0,01	1,3
Мокрий	0,27	0,077	2,3
Обводнений	0,5	0,25	3,5

Ослаблення ММВ у тумані залежить від кількості води у його обсязі. Погонне ослаблення можна визначити таким виразом:

$$b_T = L_T V_T \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right], \quad (2.24)$$

де L_T - питомий погонний коефіцієнт ослаблення;

V_T - коефіцієнт вмісту води, що визначається за оптичною видимістю.

Значення цих коефіцієнтів представлені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнтів

Величина L_T при 18°C [дБ/гкм]				
λ , мм	2	5	7	10
L_T , дБм ³ /гкм	7,14	1,65	0,876	0,438
Величина V_T [г/м ³]				
V_T , [г/м ³]	2,0	1,0	0,5	0,2
Оптична видимість, м	30	50	80	200

2.5 Поширення ММВ над підстилаючою поверхнею

Очікується, що покоління стільникового зв'язку 5G буде мати станції стаціонарні, що носяться людиною та встановлюються на автомобілях та інших транспортних засобах. Для носіїв та автомобільних систем 5G радіосигнал від передавача до приймача буде поширюватися в безпосередній близькості від підстилаючої поверхні. Підстилаюча поверхня практично завжди має шорсткість, порівнянну з довжинами хвиль ММД частот. Розглянемо особливості поширення ММВ над такою поверхнею.

У загальному випадку на приймальний пристрій буде приходити прямий сигнал від передавальної станції і сукупність відбитих від підстилаючої поверхні радіохвиль, як показано на рисунку 2.6. Відбиті хвилі прийдуть на приймальну антену з різними фазами і різними амплітудами, що висять від відбивних властивостей підстилаючої поверхні і їх буде багато, навіть при гострих (кути θ_1, θ_2) діаграми спрямованості приймальної та передавальної антен.

Оскільки поверхня, що відбиває, на відстані $a_1 + a_2$ має безліч пасивних і хаотично орієнтованих мікроретрансляторів з розмірами, які співмірні з довжиною хвилі сигналів ММД, то можна припустити, що результатом відображення ММВ буде суперпозиція великої кількості від ділових променів з випадковими амплітудами та випадковими фазами. В загальному випадку картина випромінювання від плями

відображення має всеспрямований характер через хаотичне розташування на підстилюючій поверхні мікровідбивачів сигналу.

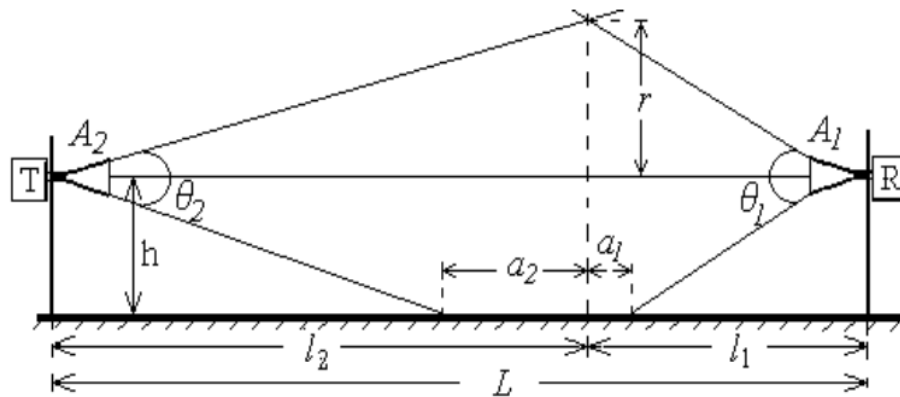


Рисунок 2.6 – Поширення радіохвиль над поверхнею, що підстиляє

Площа відображення сигналів від поверхні, що підстиляє являє собою ділянку тіла, що утворилася перетином двох параболічних конусів від діаграм спрямованості передавальної та приймальної антен, залежно від розташування ділянки, що відображає поверхні мають у випадку різні протяжності a_1 і a_2 . Вид зверху на площу відображення сигналів у такому разі матиме вигляд спотвореного еліпса, показаний на рисунку 2.7.

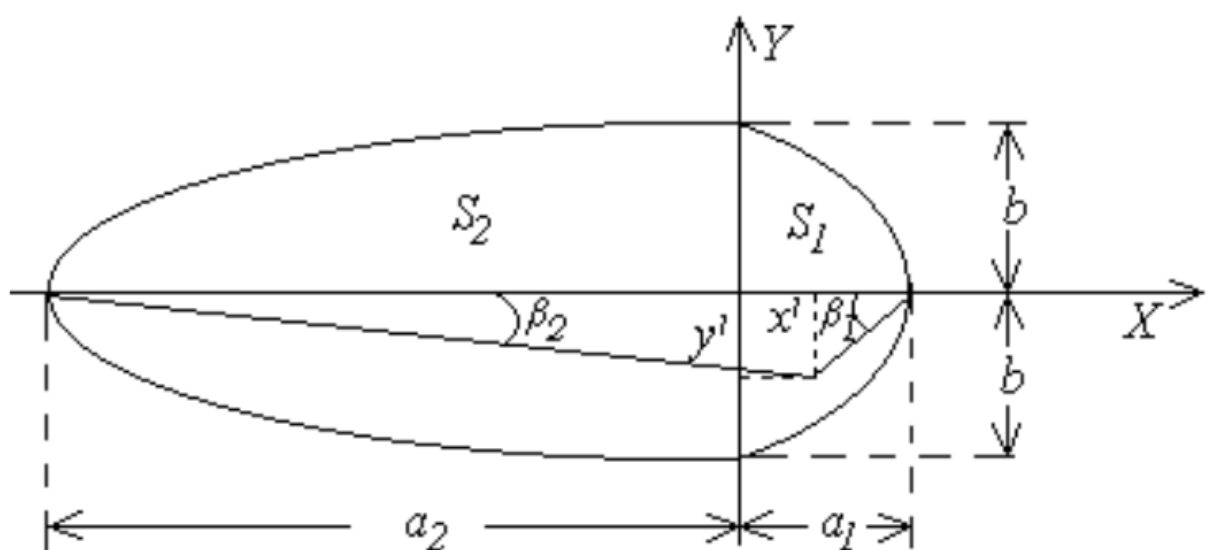


Рисунок 2.7 – Пляма відображення сигналу ММВ від поверхні, що підстиляє

З геометричних співвідношень можна визначити параметри сегментів параболи:

$$b = \sqrt{r^2 - h^2}; \quad a_1 = l_1 - h \operatorname{ctg} \frac{\theta_1}{2}; \quad a_2 = l_2 - h \operatorname{ctg} \frac{\theta_2}{2}. \quad (2.25)$$

Площі плями відображення S_1, S_2 , що визначаються відстанями до відповідних антен (l_1, l_2 на рисунку 2.6) та займані відповідними сегментами рисунка 2.7 визначаються як

$$S_1 = \frac{4}{3} b a_1; \quad S_2 = \frac{4}{3} b a_2. \quad (2.26)$$

Загальна площа відображення сигналів ММД від підстилаючої поверхні при цьому визначатиметься як

$$S = \frac{4}{3} \left[L - h \left(\operatorname{ctg} \frac{\theta_1}{2} + \operatorname{ctg} \frac{\theta_2}{2} \right) \right] \sqrt{\left(\frac{L \operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta_2}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2} + \operatorname{tg} \frac{\theta_2}{2}} \right)^2 - h^2}. \quad (2.27)$$

Для прийнятої нами моделі, коли $h \leq r$ до фіксованої потужності сигналу, що надходить прямим оптично видимим шляхом, додається потужність пропорційна величині $k\sqrt{r^2 - h^2}$, де k - деякий коефіцієнт, який визначається властивостями елементарних відбивачів на підстилаючій поверхні.

Запропонована модель може мати місце, якщо враховувати нерівномірність випромінювання ММВ усередині кутів θ_1, θ_2 . У цьому випадку кожен елемент площі S вносить у сигнал частину відбитої потужності.

Виберемо елемент, що відображає, з координатами x^1, y^1 і позначимо відбиту їм потужність, випромінювану вздовж осі антени A_1 як P_{01} . А потужність випромінювання антени в напрямку на обраний елемент, що відбиває під кутом β у горизонтальній площині від осі антени та під кутом α вниз від антени A_1 у

вертикальній площині, позначимо як $P_{u1}(\alpha_1, \beta_1)$. Аналогічно для другої антени A_2 позначимо як $P_{u2}(\alpha_2, \beta_2)$. Відносні величини потужностей позначимо як

$$q_1 = \frac{P_{u1}(\alpha_1, \beta_1)}{P_{01}}; \quad q_2 = \frac{P_{u2}(\alpha_2, \beta_2)}{P_{01}} \quad (2.28)$$

Для такої моделі потужність відбитого сигналу буде пропорційна інтегралу від $q_1 q_2$, взятого за площею S . Кордони області визначаються такими кривими: для сегмента S_1 $x^1 = \alpha^1 - y_1^2$ та для сегмента S_2 $x^1 = y_1^2 - \alpha_2$. Відповідний інтеграл матиме вигляд

$$Y = \int_{-b}^b \left[\int_0^{\alpha_1 - y_1^2} q_1 q_2 dx^1 \right] dy_1 + \int_{-b}^b \left[\int_{y_1^2 - \alpha_2}^0 q_1 q_2 dx^1 \right] dy_1. \quad (2.29)$$

Діаграми спрямованості антен описуються функціями, пропорційними

$$\frac{\sin\left(\frac{2\pi\alpha}{\theta}\right) \sin\left(\frac{2\pi\beta}{\theta}\right)}{\left(\frac{2\pi\alpha}{\theta}\right) \left(\frac{2\pi\beta}{\theta}\right)}. \quad (2.30)$$

Тоді підінтегральна функція у виразі (2.10) визначатиметься як

$$q_1 q_2 = \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi\alpha_1}{\theta_1}\right) \sin\left(\frac{2\pi\beta_1}{\theta_1}\right) \sin\left(\frac{2\pi\alpha_2}{\theta_2}\right) \sin\left(\frac{2\pi\beta_2}{\theta_2}\right)}{\frac{16\pi^2 \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2}{\theta_1^2 \theta_2^2}} \right]^2 \quad (2.31)$$

Тут кути $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ можна знайти з виразів

$$\alpha_1 = \arctg \frac{h}{a_1 - x^1}; \alpha_2 = \arctg \frac{h}{a_2 + x^1}; \beta_1 = \arctg \frac{y_1}{a_1 - x^1}; \beta_2 = \arctg \frac{y_1}{a_2 + x^1}. \quad (2.32)$$

Потужність відбитого сигналу, що приймається, пропорційна інтегралу (2.31), і вся потужність сигналу, що приймається, визначиться сумою прямої потужності P_d , що проходить оптично видимим шляхом, та відображена потужності P_{ref} від підстилаючої поверхні та від місцевих предметів на лінії зв'язку. Коефіцієнт відбиття ММВ від земної поверхні можна визначити як

$$K = \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma} / \varepsilon, K = \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma}, \quad (2.33)$$

для вертикальної та горизонтальної поляризації відповідно. Тут $\varepsilon \cong 15$ це діелектрична стала для землі або асфальту. На рисунку 2.8 представлені результати проведеного нами експерименту на лінії зв'язку ММД довжиною 65 м на частоті 28,056 ГГц. Шириною діаграм спрямованості антен передавача та приймача $\theta_1 = 3,0^\circ, \theta_2 = 8,0^\circ$ відповідно. Експеримент проводився над асфальтовою підстилаючою поверхнею. Одна антена була зафіксована на висоті 1,5 м, а іншу зрушували по висоті від 0,7 до 1,5 м.

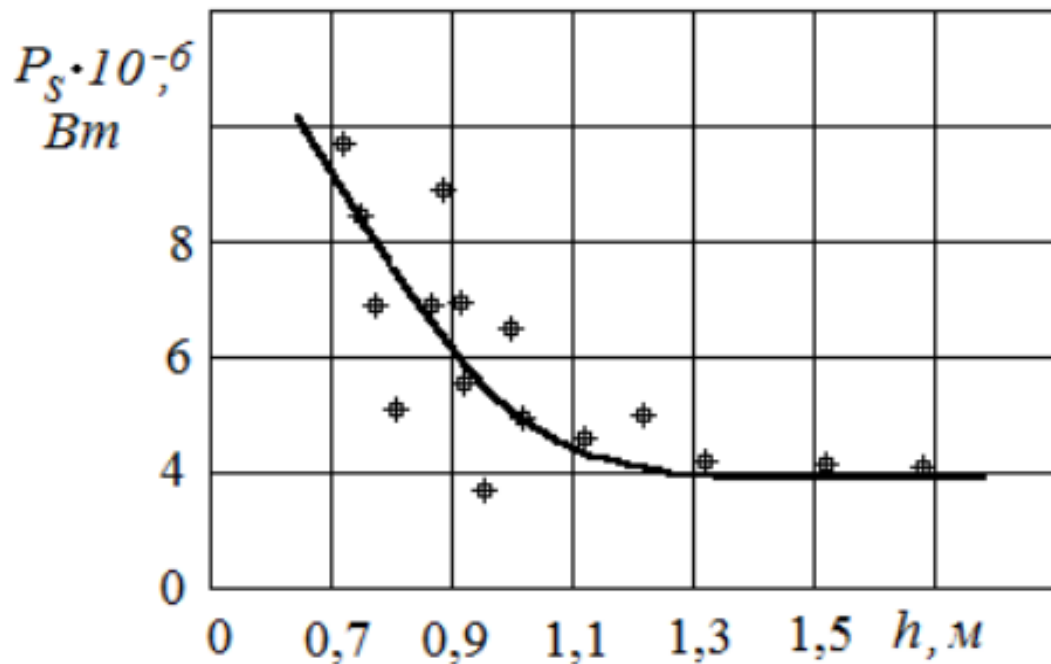


Рисунок 2.8 – Залежність величини відбитої потужності від відстані до підстилаючій поверхні від лінії радіовидимості

Отримані результати показують, що нехтувати значенням потужності, що відображається від підстилаючої поверхні та від місцевих предметів не можна. А зі зростанням площі відображення прийнятий сигнал може збільшуватися на кілька децибелів. Це можна пояснити тим, що зростання відображення відбувається при зменшенні кутів падіння та відображення хвиль.

2.6. Поглинання міліметрових хвиль перешкодами

У той час як низькочастотні сигнали можуть легко проникати через лісові масиви та крізь стіни будівель, міліметрові хвилі не проходять через більшість твердих матеріалів, затухаючи у них. Значне поглинання міліметрових хвиль спостерігається і при проходженні через ліс. Враховуючи це і ґрунтуючись на багаторічних експериментальних дослідженнях, що проводилися в різних країнах, МСЕ розробив рекомендацію MCE R P.833-5 в якій наводяться відомості, необхідні для розрахунку трас зв'язку, що пролягають через ділянки лісу.

З експериментальних даних зазначено, що лісові масиви послаблюють сигнали ММВ і навіть впливають на поляризацію сигналів. Однак сильно поляризація може змінитися тільки при великій глибині лісового масиву, а тоді сигнал буде ослаблений до мінімуму. Рекомендації МСЕ також пропонують формули для розрахунку проходить через рослинність та розсіяної складових, а також методики розрахунку сигналу дифрагуючого над верхньою частиною рослинного масиву та огиначного краю рослинного масиву. Також наведено методику для розрахунку складової, відбитої від землі. Поряд із цим у рекомендаціях наголошується, що лісові масиви не тільки послаблюють сигнали ММВ, але і викликають завмирання сигналу. Відзначено, що листяні ліси вносять більше загасання сигналу порівняно з хвойними.

Було зазначено, що коли лінія зв'язку проходить через рослинність, амплітуда прийнятого сигналу зазнає швидких змін при переміщеннях рослинності. Основною причиною такого переміщення є вітер і вимірювання на частотах 38 і 42 ГГц показали, що між частотою амплітудних флуктуацій і швидкістю вітру спостерігається сильна кореляція.

Стандартне відхилення при сильному вітрі становить майже третину від величини середніх втрат. Таблиця ілюструє динаміку завмирань сигналу ММВ у рослинності.

Таблиця 2.5 – Динаміка завмирань сигналу ММВ

Вид дерева		Шипшина (2м)	Яблуня (2,8м)	Сосна (1,5м)
Безвітря	Середня витрата (дБ)	8,6	17,6	7,7
	Стандартне відхилення (дБ)	2	2,8	2,2
Сильний вітер	Середні втрати (дБ)	11,7	17,8	12,1
	Стандартне відхилення (дБ)	4,4	4,2	4,3

У роботі наведено емпіричну формулу розрахунку поглинання в листя. Наприклад, ослаблення сигналу ММД при його поширенні через товщу листя не перевищує 400 м можна оцінити за емпіричною формулою, наведеною в цій роботі

$$b_d = 0,2f_0^{0,3}R^{0,6}[\text{дБ}], \quad (2.34)$$

де f_0 – частота, МГц; R - глибина перекриває шару листя, м.

Наприклад, на частоті 100 ГГц і при глибині листяного шару 10 м втрати можуть досягати 25,17 дБ, що на 13 дБ вище, ніж втрати на частоті 3 ГГц.

У твердих перешкодах, таких як стіни будинків, загасання ММВ дуже велике. З одного боку це добре, так як високий рівень загасання в деяких будівельних матеріалів (таких як цегла та бетон) допомагає не пустити всередину будівель

міліметрові хвилі, що випромінюються зовнішніми станціями та іншими зовнішніми джерелами перешкод. Грунтуючись на цьому для офісних пікосот мобільного зв'язку розроблено нове покоління технології Wi-Fi, що використовує частоти 60 гігагерцового діапазону, що сильно загасають в атмосфері, – стандарт IEEE 802.11ad.

У таблиці наведені експериментальні дані щодо проходження радіохвиль ММД через різні матеріали.

Таблиця 2.6 – Дані щодо проходження радіохвиль ММД через різні матеріали

Коефіцієнт ослаблення ММВ в матеріалах b_m дБ				
Матеріал	Товщина, см	Частота, ГГц		
		3	40	60
Скло	0,4	6,4	2,5	3,6
Гіпсокартон	2,5	5,4	-	6,0
Дерево	0,7	5,4	3,5	-
ДСП	1,6	-	0,6	-
Штукатурка	1,5	-	2,9	-
Цегла	10	-	178	-
Бетон	10	17,7	175	-

Проте сигнали ММВ потрапляють усередину будівель крізь вікна та дерев'яні двері. В цьому випадку всередині приміщень для якісного прийому можна використовувати інші бездротові технології, такі як репітери та фемтосоти (додаткові ретранслятори) міліметрового діапазону частот або технології, подібні до Wi-Fi.

З ПРОХОДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧЕРЕЗ РІЗНІ ВИДИ МАТЕРІЇ

3.1 Опис антен які використовувалися при проведенні експерименту

WAP 60G - це вбудований бездротовий пристрій 60 ГГц, стійкий до атмосферних впливів, який можна використовувати в приміщенні або на вулиці як пристрій "точка-точка" або CPE (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Антена діапазоном 60 ГГц

У коробку входять комплект для настінного монтажу, ремені для кріплення на стовпі, блок живлення, інжектор PoE, а також настільна підставка для використання пристрою в приміщенні. Проникає в деякі вікна залежно від матеріалу.

WAP 60G підключається до точки доступу 60 ГГц на відстані понад 200 м.

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики антени

Архітектура	ARM 32bit
ЦП	IPQ-4019
Кількість ядер процесора	4
Номінальна частота процесора	716 МГц
Розміри	185 x 85 x 30 мм
Операційна система	RouterOS
Розмір оперативної пам'яті	256 Мб
Тип зберігання	FLASH
MTBF	Приблизно 100 000 годин при 25°C
Вхідний роз'єм постійного струму	Напруга 11-57 В
Максимальна споживана потужність	5 Вт
PoE in	802.3af/at
PoE in вхідній напрузі	11-57 В

Доступність діапазону міліметрових хвиль — це малі розміри антен (що дозволяє зменшити габаритні розміри радіосистеми в цілому) і більшу абсолютну полосу частот (що забезпечує можливість спільного використання діапазону більшого числа радіосистем). Однак, згідно з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі міліметрового діапазону відчувають сильне затухання при поширенні в земній атмосфері. Затухання викликано резонансним поглинанням енергії в атмосферних газах, а також у гідрометеорах (дождь, туман, сніг і др.). Услід цієї земної радіосистеми міліметрового діапазону характеризується малою дальністю дії

(від десятків кілометрів до кількох сотен метрів) і сильною залежністю від погодних умов.

Наступний стандарт WiFi IEEE 802.11ad, можливо, буде використовуватися в діапазоні 60 ГГц для передачі даних зі швидкістю 7 Гбіт/с.

Існують плани використання цього діапазону в стандартах зв'язку нового покоління 5G.

Міліметрові хвилі поширюються лише з прямої видимості шляхів. Вони не відображаються іоносферою і не рухаються Землею як земні хвилі, як це роблять радіохвилі нижчої частоти. При типовій щільності потужності вони блокуються стінами будівель і зазнають значного загасання через листя. Поглинання атмосферними газами є важливим фактором у всьому діапазоні та збільшується з частотою. Однак він максимальний на кількох конкретних лініях поглинання, в основному для ліній кисню на 60 ГГц та водяної пари на 24 ГГц та 184 ГГц. На частотах у «вікнах» між цими піками поглинання міліметрові хвилі мають набагато менше атмосферне згасання і більший діапазон, тому багато додатків використовують ці частоти. Міліметрові довжини хвиль мають той самий порядок розмірів, що і краплі дощу, тому опади викликають додаткове згасання через розсіюння (завмирання в дощі), а також поглинання. Високі втрати у вільному просторі та атмосферне поглинання обмежують корисне поширення до кількох кілометрів. Таким чином, вони корисні для щільно упакованих мереж зв'язку, таких як персональні обчислювальні мережі, які покращують використання спектра за рахунок повторного використання частоти.

3.2 Опис експерименту

Для експерименту в приміщенні (рисунк 3.2) я використовувала 2 антени міліметрового діапазону 60 ГГц: приймальну та передавальну.

В приміщенні знаходилося дві антени, які стояли одна навпроти одної на відстані 12 метрів. Перед передавальною антеною я ставила перешкоди такі як:

аркуші паперу, яких було 10 штук, картон, скло товщиною 1мм, текстоліт товщиною 3 мм та дерево товщиною 10 мм.



Рисунок 3.2 – Місце експерименту

За допомогою програми MikroTik я проводила експеримент. MikroTik – це латвійська компанія, яка була заснована в 1996 році для розробки маршрутизаторів і бездротових систем Інтернет-провайдерів. Зараз MikroTik надає апаратне та програмне забезпечення для підключення до Інтернету в більшості країн світу.

Їх досвід використання стандартного обладнання для ПК і повних систем маршрутизації дозволив нам у 1997 році створити програмну систему RouterOS, яка забезпечує широку стабільність, контроль і гнучкість для всіх видів інтерфейсів даних і маршрутизації.

У 2002 році компанія вирішила створити власне обладнання, і народився бренд RouterBOARD. Щоб керувати антеною, я скористалася інтерфейсом Winbox для підключення до пристрою.

WinBox працює виключно з маршрутизаторами MikroTik. Пристрої інших виробників програма навіть не розпізнає. Втім, сьогодні практично кожен більш-менш іменитий виробник мережного обладнання випускає аналогічне програмне забезпечення.

3.3 Результати експерименту

На рисунку 3.3 представлений канал зв'язку 60 ГГц з прямою видимістю без перешкод.

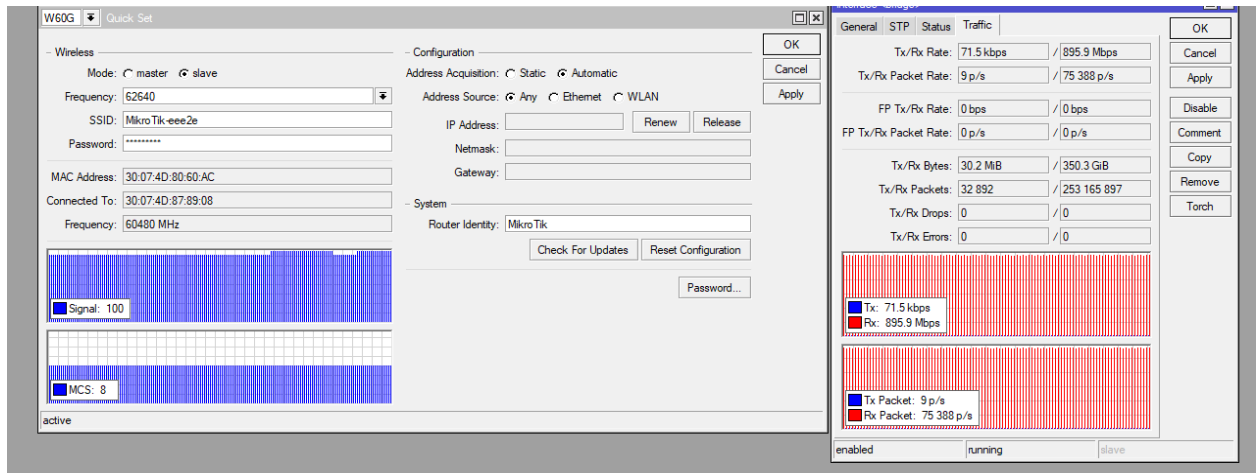


Рисунок 3.3 – Канал зв'язку 60 ГГц з прямою видимістю без перешкод

При проходженні сигналу без перешкод рівень сигналу є ідеальний $\text{Signal} = 100$. Швидкість передачі сигналу $R_x = 895,9 \text{ Mbps}$. Глубина модуляції $\text{MCS} = 8$.

На рисунку 3.4 представлений канал зв'язку 60 ГГц з перешкодою – аркуші паперу.

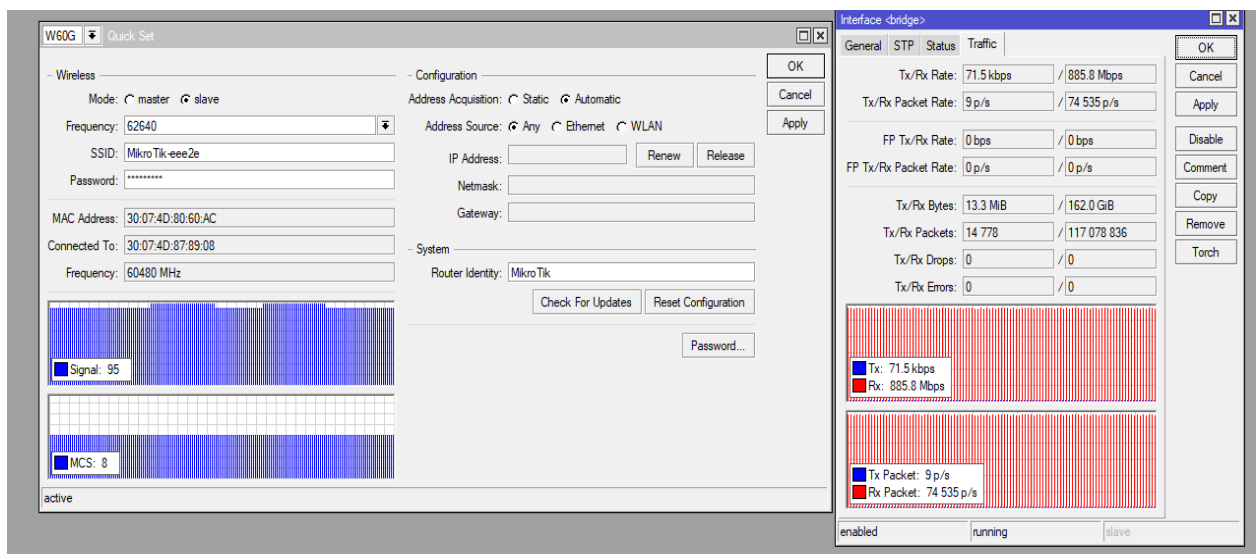


Рисунок 3.4 – Канал зв'язку 60 ГГц з внесеною перешкодою – аркуш паперу

Дивлячись рисунок 3.4 можна зробити висновок, що така перешкода, як аркуш паперу не сильно впливає на рівень сигналу $\text{Signal} = 95$, швидкість передачі сигналу $R_x = 885,8 \text{ Mbps}$ та глибину модуляції $\text{MCS} = 8$.

На рисунку 3.5 представлений канал зв'язку 60 ГГц з перешкодою – картон.

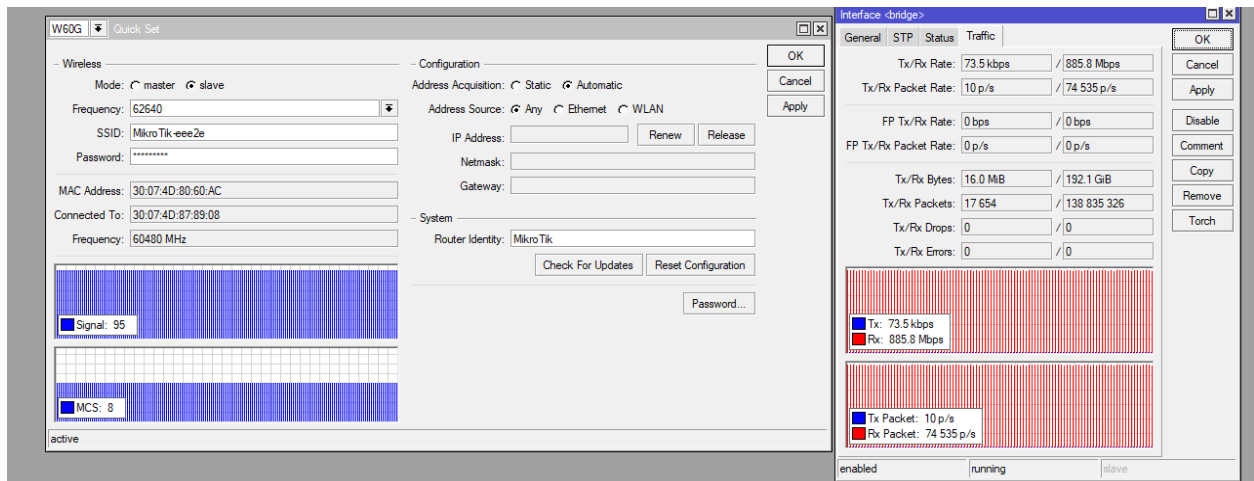


Рисунок 3.5 – Канал зв'язку 60 ГГц з внесеною перешкодою – картон

Рівень сигналу $\text{Signal} = 95$, швидкість передачі сигналу $R_x = 885,8 \text{ Mbps}$ та глибина модуляції $\text{MCS} = 8$. Отримані результати не відрізняються, якщо подивитись на результати проходження сигналу через аркуш паперу

На рисунку 3.6 представлений канал зв'язку 60 ГГц з перешкодою – скло товщиною 1 мм.

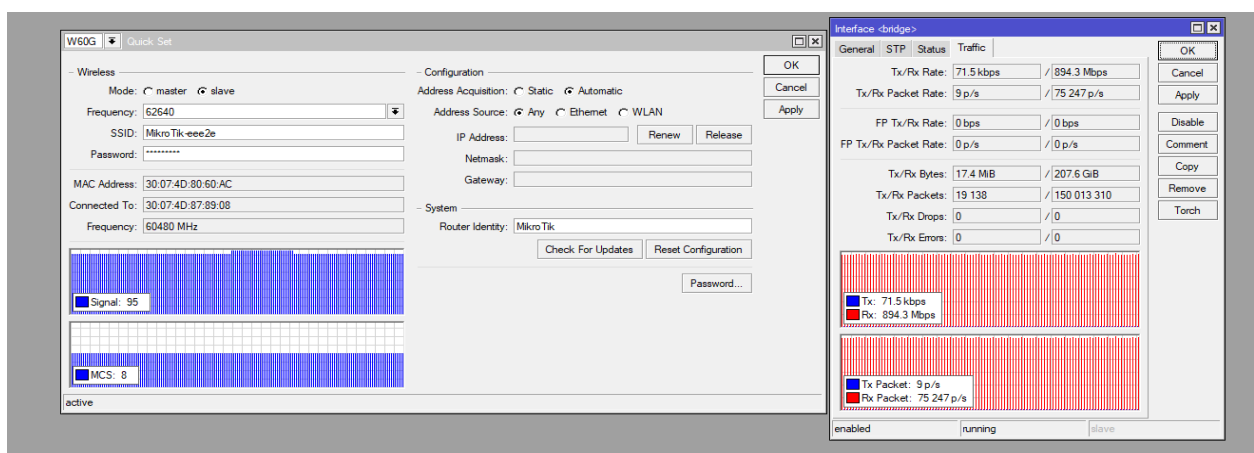


Рисунок 3.6 – Канал зв'язку 60 ГГц з внесеною перешкодою – скло

Рівень проходження сигналу через скло $\text{Signal} = 95$, такий як і рівень проходження сигналу через аркуш та картон. Швидкість передачі сигналу $R_x = 894,3 \text{ Mbps}$ та глибина модуляції $\text{MCS} = 8$.

На рисунку 3.7 представлений канал зв'язку 60 ГГц з перешкодою – текстоліт товщиною 3мм.

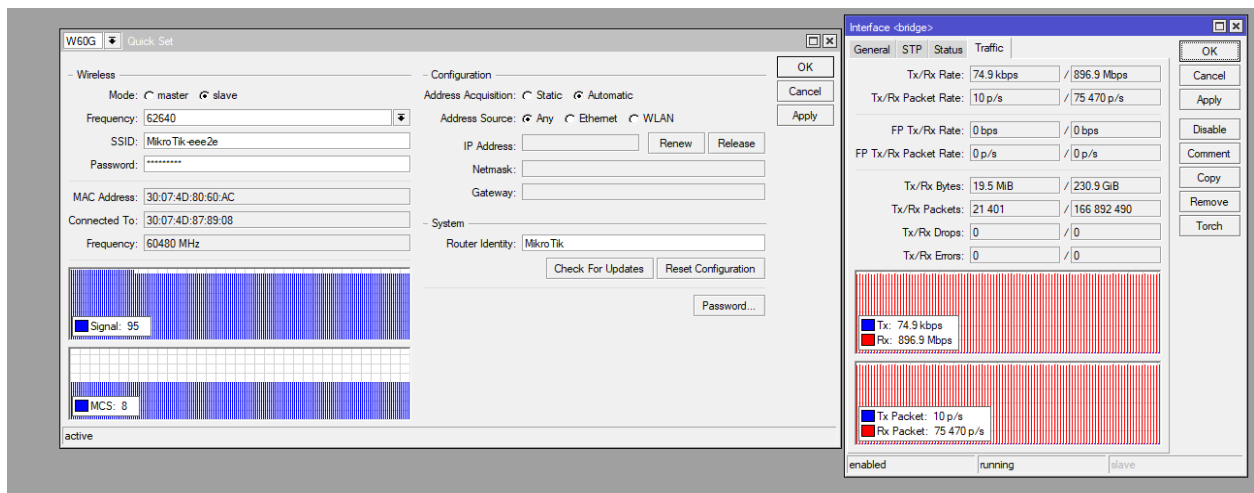


Рисунок 3.7 – Канал зв'язку 60 ГГц з внесеною перешкодою – текстоліт

Результатом проходження сигналу через текстоліт є $\text{Signal} = 95$, швидкість передачі сигналу $R_x = 896,9 \text{ Mbps}$ та глибина модуляції $\text{MCS} = 8$.

На рисунку 3.8 представлений канал зв'язку 60 ГГц з перешкодою – дерево товщиною 10 мм.

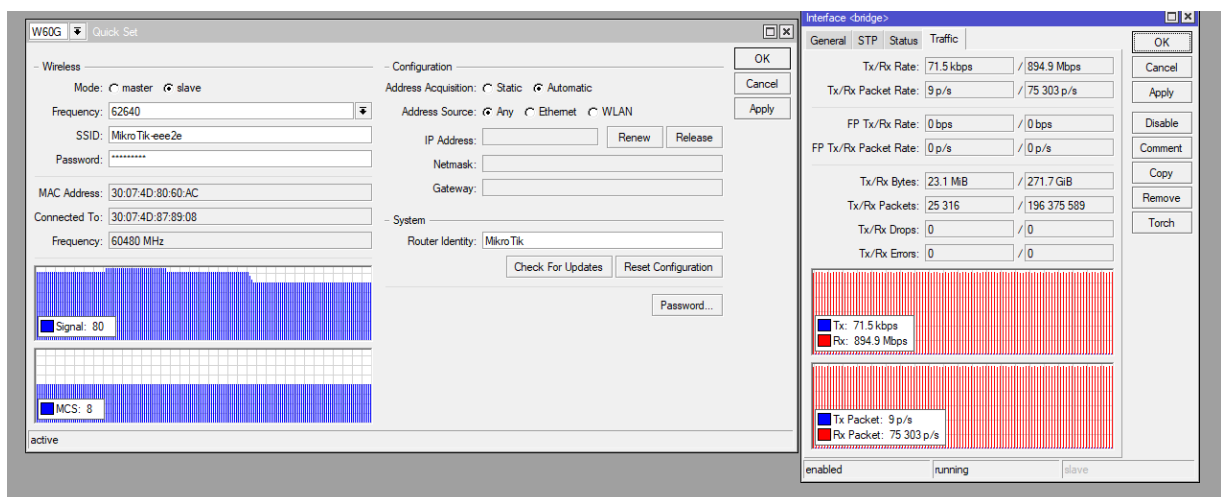


Рисунок 3.8 – Канал зв'язку 60 ГГц з внесеною перешкодою – дерево

Дивлячись на рисунок 3.8 видно, що рівень сигналу каналу зв'язку значно знизився $\text{Signal} = 80$, швидкість передачі сигналу $R_x = 894,9 \text{ Mbps}$ та глибина модуляції $\text{MCS} = 8$.

Порівнюючи всі перешкоди можна зробити висновок, що рівень проходження сигналу через аркуш, картон, скло, текстоліт майже не відрізняється від ідеального стану без перешкод. Тоді як рівень проходження сигналу через дерево нижчий.

ВИСНОВКИ

Дослідження проходження міліметрового діапазону через різні види матерії є актуальною темою тому, що питання впровадження п'ятого покоління мобільного зв'язку 5G є актуальним. У стандарті 5G передбачена робота на частотах 24 ГГц і вище, такий сигнал 5G не здатний ефективно працювати з відривом більше кількох сотень метрів між передавачем і приймачем, на відміну сигналів 4G чи 5G нижчої частоти (до 6 ГГц). В результаті базові станції 5G повинні розташовуватись через кожні кілька сотень метрів, щоб використовувати ці високі частоти. Крім того, настільки високочастотні сигнали з великими втратами проникають через тверді об'єкти, такі як автомобілі, дерева та стіни.

В кваліфікаційній роботі магістра на тему «Дослідження проходження хвиль міліметрового діапазону через різні види матерії».

У результаті роботи було вирішено наступні поставлені задачі:

- необхідність зростання швидкості передачі у мережах мобільного зв'язку;
- можливі напрямки для створення стандарту рухомого зв'язку 5G;
- розробку математичної моделі радіоканалів міліметрового діапазону частот;
- модель замирань сигналу в каналах ММД;
- досліджено проходження хвиль міліметрового діапазону через різні види матерії.

Особливістю хвиль міліметрового діапазону є сильне загасання при проходженні через перешкоди, наприклад, дерево, що було доведено в експерименті.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Тихвінський В.О., Бочечка Г.С. Перспективи міліметрового діапазону для 5G / Перша миля. – 2014, № 2. – С. 36-39.
2. Електронний ресурс. Говоркова В. Що потрібно знати про стандарт 5G. Код доступу: <https://kapital.kz/world/53278/chto-nuzhno-znat-o-standarte-svyazi-5g.html/>
3. Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи та практичне застосування. Вид. 2-е, випр.: Пер. з англ. - М: Видавничий дім "Вільямс". – 2004. – 1104 с.
4. Електронний ресурс. <http://www.buchmann.ca/> - «Batteries in a Portable World. A handbook on rechargeable batteries for non-engineers» — інтернет версія книги Isidor Buchmann, голови канадської компанії Cadex Electronics Inc.
5. Регламент радіозв'язку. - Вид. МСЕ, у 4-х томах. – 2008.
6. Електронний ресурс. 21.10.2016. Qualcomm оголошує про появу першого модему для мереж 5G. Код доступу: <http://www.contentreview.com/articles/3748>
7. Надмірність сигналів у радіозв'язку / За ред. А.Г. Самійлова. - М: Радіотехніка. – 2007. – 256 с.
8. Немирівський А.С., Рижков Є. В. Системи зв'язку та радіорелейні лінії. -М: Зв'язок, 1980. - 432с.
9. Калмиков Ю.П, Тітов С.В. Про спектр поглинання молекулярного кисню в 0-ТГц діапазоні частот / Изв. ВНЗ, Радіофізика. - 1989, т.32, № 8. – С.933-944.
10. Розанов Б.А., Фетісов І.М., Зражевський А.Ю., Коньков Є.В. Дослідження поширення міліметрових радіохвиль у приземному шарі атмосфери / Вісник МДТУ, Серія "Приладобудування", 1990, N 1, с.60-66.
11. Андрєєв Г.А., Мартинова З.А., Хохлов Г.І. Вплив відображення підстилаючої поверхні на прийом ММВ/Радіотехніка, 1979, т. 34, N 8, с. 73- 74.
12. A. Alejos, M.G. Sanchez, and I. Cuinas. Measurement and Analysis of Propagation Mechanisms at 40 GHz: Viability of Site Shielding Forced By Obstacles. – IEEE Trans. Vehic. Tech., vol. 57, no. 6, Nov. 2008.

13. Долуханов М.П. Поширення радіохвиль. Підручник для вишів. - М., Зв'язок, 1972, 336 с.
14. Красюк В.М., Платонов О.Ю., Мельникова О.Ю. Особливості поширення радіохвиль міліметрового діапазону та перспективи їх використання в сучасних радіотехнічних системах / Інформаційно керуючі системи. – №4, 2003. – С. 33-38.
15. Куракова Т.П. Використання міліметрового діапазону хвиль для мобільного зв'язку покоління 5G / Проектування та технологія електронних засобів. – 2016, №4. - С. 3-7.
16. Куракова Т.П., Михайлов С.М. Моделювання каналів стільникового зв'язку нового покоління // Зб. статей за матеріалами 1-ої ВНПК "Інфотелеком мунікації та космічні технології: стан, проблеми та шляхи вирішення". - Курськ. - У 2-х частинах. - 2017, ч.1. - С.61-66.
17. Електронний ресурс. Приймальні модулі ММД <http://studall.org/all-903.html>.
18. A. Alejos, M.G. Sanchez, and I. Cuinas. Measurement and Analysis of Propagation Mechanisms at 40 GHz: Viability of Site Shielding Forced By Obstacles. – IEEE Trans. Vehic. Tech., vol. 57, no. 6, Nov. 2008.