

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МЕРЗЛІКІН АНАТОЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.391.8

ДИСЕРТАЦІЯ
**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА
ГОТОВНОСТІ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ
ХВИЛЬ**

Спеціальність: 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Галузь знань: 17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

_____ А.О. Мерзлікін

Науковий керівник Цопа Олександр Іванович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Мерзлікін А.О. Методи та засоби підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (17 – Електроніка та телекомунікації). – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено актуальному завданню дослідження особливостей поширення радіохвиль міліметрового діапазону хвиль (ММ ДХ), розрахунку готовності каналів зв'язку, та розробці працюючих ліній ММ ДХ з урахуванням мікрокліматичних параметрів, характерних для Харківського регіону у місті Харкові.

Актуальність полягає у створенні баз даних шляхом експериментальних досліджень, без яких є недоцільним введення нового покоління зв'язку в Україні. Без даних про опади з коротким періодом усереднення, та без експериментальних досліджень атмосферного ослаблення в діапазоні ММ хвиль неможливо та економічно недоцільно вводити оптимізовані мережі наступних поколінь 5G-6G в Україні. ММ ДХ працює на високих частотах від 30 ГГц до 300 ГГц, такий сигнал не здатен стабільно працювати на великих відстанях. У багатьох країнах зараз активно проводяться дослідження у цьому напрямку. В США, Китаї та деяких інших країнах вже активно вводиться 5G, це можна помітити дивлячись на те як виробники смартфонів у свої нові гаджети активно встановлюють процесори здатні працювати з мережами нового покоління. Україна на жаль поки що не може почати впроваджувати канали зв'язку які будуть працювати у ММ ДХ із за відсутності даних про вплив опадів та атмосфери на поширення діапазону 30-300ГГц. Якщо створити бази даних про кількість опадів, то можна буде отримати коефіцієнт готовності радіоліній і виходячи з цих даних побудувати лінії зв'язку з високим коефіцієнтом

надійності. Антени у мережах зв'язку нового покоління потрібно встановлювати від 1000 до декількох сотень метрів одна від іншою, що в кінцевому результаті несе великі витрати при побудові каналів зв'язку. Для зменшення цих витрат, потрібно розрахувати параметр готовності і встановлювати антени на максимально допустимій відстані на якій вони будуть коректно працювати весь час. Отже постає актуальна задача зменшення витрат, для цього потрібно точно розрахувати готовність каналу зв'язку ММ ДХ.

Також основною задачею є підвищення пропускної здатності та продуктивності каналу зв'язку ММ ДХ. Який вплив здійснюють опади на поширення радіохвиль 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц, кількість опадів у літні місяці в місті Харкові, робота радіомоста 60 ГГц у межах приміщення в залежності від кута напрямку антени. На ці питання буде дана відповідь у науковому дослідженні, що є актуальним науково-технічним напрямом, враховуючи підвищений попит на пропускну здатність ліній передачі даних, зростання кількості пристроїв потребуючих виходу в інтернет, зростання попиту на хмарні технології та розвитку інтернету речей. У роботі досліджено вплив на поширення радіохвиль ММ ДХ залежно від інтенсивності опадів, процент втрати рівня сигналу та швидкості на частоті 60 ГГц точка-точка в межах приміщення залежно від спрямованості антен, приведено можливі варіанти побудови зв'язку п'ятого покоління в місті. Для розрахунків використовувалися методи та рекомендації ІТУ. Проблемою введення 5G в Україні є відсутність даних кількості опадів, для побудови каналів зв'язку можна було використовувати дані ІТУ, але виходячи з рекомендацій ІТУ що для більш стабільної роботи радіоліній ММ ДХ краще використовувати статистику опадів отриману на місці побудови передбачуваних каналів зв'язку, було прийняте рішення зібрати необхідні дані та розрахувати кумулятивний розподіл питомого загасання атмосфери для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц для міста Харків. У процесі дослідження сформульованої наукової проблеми були отримані наступні результати. На основі отриманих теоретичних і експериментальних досліджень вирішена задача побудови

каналів зв'язку в найгірші місяці з точки зору поширення ММ ДХ у місті Харків, розраховано кумулятивний розподіл питомого загасання атмосфери для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц, та сукупний розподіл питомого загасання атмосфери за 4-місячний період 2018 та 2019, побудовано працюючу модель (60 ГГц) у межах приміщення.

В умовах відсутності оригінальних досліджень по вертикальному ослабленню радіохвиль в хмарному покриві над Україною залишаються відкритими питання застосування результатів європейських та американських авторів до території України в цілому, а особливо до її окремих регіонів. Відсутня також і метеорологічна інформація про водності хмарного шару і її мінливості від регіону до регіону, на підставі якої дана проблема могла б бути вирішена за допомогою стандартних підходів розрахунковими методами.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення моделей оцінки продуктивності систем зв'язку та методів радіометричних досліджень характеристик атмосфери, що дозволять отримати інформацію про загасання сигналів міліметрового діапазону для підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону радіохвиль шляхом обґрунтованого врахування впливу на радіоканал мікрокліматичних факторів атмосфери.

Об'єкт дослідження – процес поширення радіохвиль ММ діапазону в атмосферних лініях зв'язку

Предмет дослідження – моделі та методи оцінки загасання ММ ДХ в атмосфері, моделі визначення параметрів продуктивності та готовності каналів зв'язку швидкісної безпроводової мережі передачі інформації.

Головний науковий результат дисертації – розроблені і експериментально перевірені методи та засоби підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку ММ ДХ, що враховують вплив різноманітних факторів атмосфери та регіональних мікрокліматичних особливостей на поширення та ослаблення радіохвиль.

Наукова новизна:

1. Розроблено вдосконалену математичну модель оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку, яка реалізована у вигляді комп'ютерної програми в середовищі MATLAB, що дозволяє визначати максимальний радіус зони обслуговування та врахувати: сценарії розгортання системи, параметри кліматичної зони, поглинання в газах, інтенсивність опадів, тип модуляційної схеми та кодування (MCS_i) обладнання.

2. Розроблено нову методику проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом (1 хвилина та менше) з використанням оригінального програмно-апаратного радіометричного комплексу для частоти 40 ГГц (8мм), що дозволило після відповідної статистичної обробки результатів вимірювань отримати нові дані про кумулятивні функції сезонного розподілу повного вертикального атмосферного послаблення продовж року та у найгірші місяці року для забезпечення надійного зв'язку в розглянутому діапазоні частот.

3. Вперше отримано кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ ДХ за річний період та помісячно, що отримані з використанням розроблених засобів радіометрії, які забезпечують оцінку надійності високошвидкісних наземних та наземно-космічних каналів зв'язку в Україні.

4. Подальший розвиток отримала математична модель оцінки продуктивності та завадостійкості системи зв'язку, яка відрізняється врахуванням діаграм спрямованості антен базових станцій, фазових антенних решіток (ФАР) точок доступу та пристроїв користувачів, що дозволяє виконувати дослідження в умовах щільної міської забудови.

5. Розроблено нову багатопроменеву модель поширення радіохвиль ММ ДХ для закритого простору, яка відрізняється врахуванням діелектричних характеристик матеріалів стін, полу та стелі, що дозволило отримати теоретичну оцінку досяжних швидкостей передачі інформації для внутрішніх коридорів будівель (*Indoor*) мережі передачі інформації для апаратури стандарту

IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції та кодування (MCS) і різні типи антен.

6. Отримані нові дані про енергетичний потенціал ліній зв'язку для відкритого простору (*Outdoor*) з використанням створеної експериментальної приземної лінії зв'язку на основі використання точок доступу *MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit)* у діапазоні 60ГГц (5мм), що дозволило та показало реалізованість сценарію розгортання мереж 5G в діапазоні 60 ГГц на базі малих сотів (*Small Cell*).

Обґрунтованість та достовірність результатів дисертаційної роботи забезпечується коректним застосуванням методів радіометричних вимірювань, методів теорії цифрового зв'язку та підтверджується збігом даних натурних експериментів та числових розрахунків.

У ході виконання дисертаційної роботи використано метод комплексування засобів і методів дистанційного моніторингу радіофізичних і метеорологічних параметрів атмосфери, які використовують як активні, так і пасивні системи зондування і які працюють в ближньому інфрачервоному і міліметровому діапазонах хвиль. Запропонована методологія вирішення поставленої в роботі актуальної проблеми оцінки сезонних і регіональних відмінностей характеристик проходження сигналів ММ діапазону буде відрізнятися методичною оригінальністю, спрямованою на досягнення цілей НДР у відносно короткий проміжок часу з мінімальними матеріальними витратами. Використання найбільш сучасних моделей, які описують зв'язок метеопараметрів атмосфери з характеристиками її фізичних полів, в сукупності з комплексом радіофізичної апаратури, повинні забезпечити сприяння опису і пояснення ряду аномальних атмосферних явищ, що виявляються в екстремальних завмираннях або ослаблення сигналів в лініях зв'язку ММ діапазону радіохвиль.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом наукових досліджень автора. Основні наукові результати, які наведені у дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно і досить повно викладені

в 16 наукових роботах, опублікованих здобувачем у співавторстві і самостійно. У роботі [1], яку здобувач виконав особисто, проведено аналіз технічної архітектури радіомодемів фірми *Mikrotik RBwAPG-60ad*, які реалізують гібридну (аналого-цифрову) схему обробки сигналів, та представлені результати експериментальних досліджень продуктивності каналу зв'язку міліметрового діапазону хвиль у навчальній аудиторії (*Indoor*). Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, полягає в наступному. В роботі [2] здобувач запропонував для реалізації комунікаційної складової програми атмосферних досліджень рівня послаблення радіохвиль мікроволнового діапазону частот побудувати експериментальну приземну лінію зв'язку на основі використання точок доступу *MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit)* у діапазоні 60 ГГц, що дозволило отримати нові дані про енергетичний потенціал лінії зв'язку для відкритого простору (*Outdoor*) та показало реалізованість сценарію розгортання мереж 5G в діапазоні 60 ГГц на базі малих сотів (*Small Cell*). У роботі [3] представлені нові результати, які дисертант отримав при створенні оригінального програмно-апаратного радіометричного комплексу для частоти 40 ГГц та методики проведення річних цілодобових експериментальних досліджень, що дозволило після відповідної статистичної обробки результатів вимірювань отримати дані про кумулятивні функції сезонного розподілу повного вертикального атмосферного послаблення продовж року та у найгірші місяці року для забезпечення надійного зв'язку в розглянутому діапазоні частот. У матеріалах роботи [4] здобувачем створена вдосконалена математична модель оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку, яка реалізована у вигляді комп'ютерної програми в середовищі MATLAB, що дозволяє визначити максимальний радіус зони обслуговування та врахувати: сценарії розгортання системи, параметри кліматичної зони, поглинання в газах, інтенсивність опадів, тип модуляційної схеми та кодування (*MCS_i*) обладнання. Матеріали публікації [5] здобувача є продовженням теми наукових досліджень, де дисертант доповнив математичну модель, що дозволяє при оцінці продуктивності та завадостійкості системи зв'язку в умовах щільної

міської забудови врахувати діаграми спрямованості антен базових станцій, фазових антенних решіток (ФАР) точок доступу та пристроїв користувачів. В статті [6] здобувач отримав теоретичну оцінку досяжних швидкостей передачі інформації для внутрішніх коридорів будівель (*Indoor*) мережі передачі інформації для апаратури стандарту IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції та кодування (*MCS*).

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи представлені та обговорювалися на таких науково-технічних конференціях: 19, 20, 24 Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (МРФ Харків, Україна, 2015, 2020); 4th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET, Lviv, *Ukraine*, 2018); 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT, Lviv, *Ukraine*, 2019); IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW, Kharkiv, *Ukraine*, 2020); IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON, Lviv, *Ukraine*, 2021); 17th International scientific and practical conference «System analysis and intelligent systems for management» (Ankara, Turkey. 2023).

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача поширення радіохвиль ММ ДХ. отримано кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ ДХ за річний період та помісячно, що забезпечують оцінку надійності інфо-ємних високошвидкісних наземно-космічних каналів зв'язку в Україні. Вперше отримано кумулятивні функції розподілу приземного погонного ослаблення радіохвиль СМ та ММ ДХ за річний період та для найгіршого періоду року, необхідні для забезпечення оцінок готовності перспективних мереж та ліній приземного зв'язку в Україні, що відрізняються підвищеним ступенем надійності. Отримана нова, удосконалена модель для отримання залежності швидкості передачі C від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц як точка-точка (*Indoor LOS, NLOS*) та уперше проведено розрахунки готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону і оцінка їх

продуктивності з урахуванням мікрокліматичних особливостей регіону України.

В ході вирішення вказаної задачі отримані такі науково-практичні результати:

1. Отримано результати натурних випробувань експериментальної приземної лінії зв'язку на основі використання точок доступу *MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit)* у діапазоні 60ГГц (5мм), що дозволяє визначити максимальний радіус зони обслуговування та врахувати: сценарії розгортання системи, параметри кліматичної зони, поглинання в газах, інтенсивність опадів, тип модуляційної схеми та кодування (*MCS_i*) обладнання.

2. Для забезпечення цілодобового моніторингу та збору в автоматичному режимі з хвилинним інтервалом вимірювань радіофізичних і метеорологічних даних в ХНУРЕ розроблено методику досліджень та виготовлено дослідний зразок наземного радіометричного комплексу, в склад якого входить модуляційний радіометр діапазону 40 ГГц (8мм) з флуктуаційною чутливістю 0,2 К та погодна станція.

3. Розроблено програмно-апаратний модуль для сполучення детекторної схеми радіометра з послідовним інтерфейсом ПК, що дозволяє передавати вимірювальну інформацію безпосередньо в електронну таблицю *Excel* для накопичування бази даних та її обробки.

4. Розроблено методику налаштування програмного додатку *WinBox* для керування пристроями на базі *Mikrotik RouterOS*, яка дозволяє налаштувати безпроводові точки доступу на тестування каналу зв'язку за допомогою трафік генератору, встановлювати параметри з'єднання: діапазон частот, потужність сигналу, протокол мережевої взаємодії (*IP, UDP*), розмір інформаційних пакетів, а також візуалізувати результати виміру рівня сигналу на вході приймача, тип модуляції та кодування сигналу, швидкості передачі параметри та якості з'єднання.

5. Матеріали дисертаційної роботи використовуються в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки на кафедрі

радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем в курсах лекцій з дисциплін «Новітні напрямки розвитку телекомунікаційних та радіотехнічних систем», «Радіопередавальні пристрої» та «Радіоприймальні пристрої» при навчанні студентів освітньо-професійної програми «Інформаційні радіотехнології» та при підготовці магістерських атестаційних робіт, про що є відповідний акт впровадження. (Акт від 11.01.2023 р., м. Харків, Україна).

Отримані результати дають можливість введення каналів зв'язку нового покоління у місті Харкові, та маючи данні опадів у інших регіонах країни можна легко зробити розрахунки по загасанню ММ ДХ.

За темою дисертації загалом опубліковано 16 наукових робіт, у тому числі 6 статей у провідних наукових виданнях, в тому числі 4 статті у фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Міністерством освіти і науки України та одна стаття, що індексується у світових наукометричних базах даних Scopus, 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях (в тому числі 4 у Scopus) та одного патенту на корисну модель.

Ключові слова: прогнозування, міліметровий діапазон хвиль, діаграма спрямованості антени.

Список публікацій здобувача:

Статті

1. Мерзлікін А.О. Експериментальні дослідження пропускнуої здатності каналу зв'язку міліметрового діапазону хвиль всередині приміщень / Журнал «Проблеми телекомунікацій». – 2022. – № 2 (31); – С. 23-33.

2. Аппаратурно-методическое обеспечение научно-прикладной радиометрии атмосферы / В.К. Волосюк, С.С.Жила, А.Д. Собколов, В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, Д.С. Сальников, А.А. Мерзликин, А.И. Цопа // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Выпуск № 196. – С. 5-21.

3. Кумулятивные функции вертикального атмосферного ослабления

миллиметровых радиоволн над Харьковом / С.С.Жила, А.А. Мерзликин, А.В. Одокиенко, В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, А.Д. Собколов, А.И. Цопа // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2019. – Выпуск № 199. – С. 83-90.

4. Определение характеристик готовности и пропускной способности канала связи миллиметрового диапазона волн. / А.А. Мерзликин, Д.С.Сальников, А. Н. Битченко, Н.В. Руженцев, А. И. Цопа // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2019. – Выпуск № 199. – С. 45-53.

5. Tsopa O., Dudka O., Merzlikin A., Astrashkov M. Performance Evaluation of 5G Millimeter-Wave Cellular Network in dense Urban Development / Journal Review of International Geographical Education. – SPRING, 2021; – №11(8); – pp. 1592-1600. (Scopus)

6. Мерзлікін А.І., Цопа О.І. Продуктивність каналу зв'язку стандарту IEEE 802.11.ad у коридорах будівель / International scientific journal «Grail of Science». – International Centre Corporative Management (Вінниця, Україна - Відень, Австрія). – 2022. Випуск №23. – С. 274-280.

Тези доповідей

7. Methodical maintenance of radiometric measurements of atmosphere at millimeter waves range / V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, D. S. Salnikov, A. I. Tsopa, A. O. Merzlikin // *Proc. of XIV International Conf. Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science /TCSET'2018/*. – Lviv-Slavsko, 2018. – P.1-4. (Scopus)

8. Умрыхина Д., Цопа А.И., Мерзликин А.А. Построение и исследование канала связи миллиметрового диапазона 60 ГГц внутри помещения // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Наукоємні технології в інфокомунікаціях» (НІСТ-2019)*. – Кам'янець-Подільський, 2019. – С. 128-129.

9. Merzlikin A., Tsopa O., Nikolay Ruzhentsev N. Cumulative Distribution of Rain Rate and Rain Attenuation in Ukraine // *3rd IEEE International Conference*

«Advanced Information and Communication Technologies» (AICT'2019, Lviv, Ukraine). – pp. 1-4. (Scopus)

10. Peculiarities of Microwaves Attenuation Statistics for Ukrainian Region // A. Merzlikin, V.Pavlikov, N. Ruzhentsev, A. Sobkolov, O.Tsopa, S. Zhyla // *10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW, Kharkiv, Ukraine, 2020)*; – pp. 761-764. (Scopus)

11. Tsopa O., Dudka O., Merzlikin A., Ruzhentsev N. Estimation of the bandwidth of the communication channel of 5G networks based on small cells // *IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering IEEE. – (UKRCON, Lviv, Ukraine, 2021)*; – pp. 525-529. (Scopus)

12. Дослідження і оцінка роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону/ В.В. Верягін, А.О. Мерзлікін // *Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі: матеріали 24-го Міжнар. молодіжн. Форуму (МРФ), 7–9 квітн. 2020 г. –Харків: ХНУРЕ, 2020. –Т. 3. – С. 149-150.*

13. Проблеми енергоспоживання і маршрутизації в бездротових сенсорних мережах / І.В. Горбовцова, А.О. Мерзлікін // *Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі: матеріали 24-го Міжнар. молодіжн. Форуму (МРФ), 7–9 квітн. 2020 г. –Харків: ХНУРЕ, 2020.–Т. 3.–С. 143-144.*

14. Мерзликин А.А. Особенности проектирования встраиваемых систем / 19-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (МРФ). Сб. материалов форума. Т. 3. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – С. 152-153.

15. Tsopa O., Dudka O., Merzlikin A. Basic Technologies and Techniques ML/AI for Improving Physical Layer Security for 5G/6G Communication Systems // *Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference. Ankara, Turkey. 2023. – pp. 403-408.*

Патент

16. Патент України на корисну модель № 142422, МКІ H04L 1/00 (2016/01). Неалгебраїчний декодер з підвищеним захистом від перехоплення

інформації / О. М. Бітченко, О.І. Цопа, Д. Г. Ганшин, А.О. Мерзлікін. – Заявка № u 201910239 від 07.10.2019 р. – Бюл. №11. – 2020. – 10 с.

ABSTRACT

Merzlikin A.O. Methods and means of enhancing the productivity and communication channels readiness of the millimeter wavelength. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 "Telecommunications and radio engineering" (17 - Electronics and telecommunications). - Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation is devoted to the current task of researching the characteristics of the propagation of radio waves of the millimeter wave frequency range (MM DW), calculating the readiness of communication channels, and developing working MM DW lines taking into account the microclimatic parameters characteristic of the Kharkiv region in the city of Kharkiv.

The relevance lies in the creation of databases through experimental studies, without which it is impractical to introduce a new generation of communication in Ukraine. Without data on precipitation with a short averaging period, and without experimental studies of atmospheric attenuation in the MM wave frequency range, it is impossible and economically impractical to introduce optimized networks of the next 5G-6G generations in Ukraine. MM DW works at high frequencies from 30 GHz to 300 GHz, such a signal is not capable of working stably over long distances. Many countries are now actively conducting research in this direction. In the USA, China and some other countries, 5G is already being actively introduced; this can be observed by looking at how smartphone manufacturers are actively installing processors capable of working with next-generation networks in their new gadgets. Unfortunately, Ukraine cannot yet start implementing communication channels that will work in MM DW due to the lack of data on the influence of precipitation and the atmosphere on the spread of the 30-300 GHz range. If a database is to be created on the amount of precipitation, it would be possible to calculate the availability coefficient of radio lines; based on this data communication lines with a high

reliability coefficient could be built. In the next-generation communication networks, antennas have to be installed from 1000 to several hundred meters apart from each other, which results in high costs for the construction of communication channels. To reduce the expenses, the readiness parameter needs to be calculated and the installation of the antennas should be done at the maximum permissible distance at which they will work correctly all the time. Therefore, a relevant task of reducing costs emerges, to tackle which it is necessary to accurately calculate the readiness of the millimeter wave communication channel.

Another pivotal task is to increase the capacity and productivity of the millimeter wave communication channel. Factors to be considered include the impact of precipitation on the propagation of radio waves 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz and 94 GHz, the amount of precipitation in the summer months in the city of Kharkiv, the operation of the 60 GHz radio bridge within the premises depending on the angle of the antenna direction. These questions will be answered in a scientific study, which is a relevant scientific and technical direction, considering the escalated demand for the bandwidth of data transmission lines, increasing number of devices requiring access to the Internet, the growing demand for cloud technologies and the development of the Internet of Things. The paper examines the effect on the propagation of MM DW radio waves depending on the intensity of precipitation, the percentage of loss of signal level and speed at a frequency of 60 GHz point-to-point within the premises depending on the direction of the antennas, and possible options for building fifth-generation communication in the city are given. ITU methods and recommendations were used for calculations. The problem of the introduction of 5G in Ukraine is the lack of data on the amount of precipitation, for the construction of communication channels it was possible to use ITU data, but based on the recommendations of the ITU that for more stable operation of MM DW radio lines it is better to use precipitation statistics obtained at the place of construction of the intended communication channels, it was decided to collect the necessary data and calculate the cumulative distribution of specific attenuation of the atmosphere for the frequencies of 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz and 94 GHz for the city of Kharkiv. During

the study of the formulated scientific problem, the following results were obtained: the problem of building communication channels in the worst months in terms of the spread of millimeter waves in the city of Kharkiv was solved on the basis of the received theoretical and experimental studies; the cumulative distribution of the specific attenuation of the atmosphere was calculated for the frequencies of 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz and 94 GHz; the cumulative distribution specific attenuation of the atmosphere for the 4-month period of 2018 and 2019 was also determined; a working model (60 GHz) was built within the premises.

In the absence of original studies on the vertical attenuation of radio waves in the cloud cover over Ukraine, questions regarding the application of the results of European and American authors to the territory of Ukraine, and especially to its individual regions, remain open. There is also no meteorological information about the water content of the cloud layer and its variability from region to region, on the basis of which this problem could be solved by standard approaches using calculation methods.

The aim of the dissertation work is to improve models for evaluating the performance of communication systems and methods of radiometric studies of the characteristics of the atmosphere, which will allow obtaining information about attenuation of millimeter range signals to improve the performance and readiness of millimeter wave communication channels by a reasoned consideration of the impact of atmospheric microclimatic factors on the radio channel.

The object of the study is the process of propagation of radio waves of the MM range in atmospheric communication lines.

The subject of the study is models and methods for assessing the attenuation of MM DW in the atmosphere, models for determining performance parameters and availability of communication channels of a high-speed wireless information transmission network.

The main scientific result of the dissertation is the developed and experimentally tested methods and means of increasing the productivity and availability of MM DW communication channels, which considers the impact of

various atmospheric factors and regional microclimatic features on the propagation and attenuation of radio waves.

Scientific novelty:

1. An improved mathematical model for evaluating the performance and readiness of the communication system has been developed, which is implemented as a computer program in the MATLAB environment. This allows us to determine the maximum radius of the service coverage area and consider: system deployment scenarios, parameters of the climatic zone, gas absorption, rainfall intensity, type of modulation scheme and coding (MCSi) equipment.

2. A new method of conducting annual round-the-clock experimental studies with a high time resolution (1 minute and less) using the original software-hardware radiometric complex for the frequency of 40 GHz (8 mm) was developed, which made it possible to obtain new data on cumulative functions after appropriate statistical processing of the measurement results seasonal distribution of total vertical atmospheric attenuation throughout the year and in the worst months of the year to ensure reliable communication in the considered frequency range.

3. For the first time, the cumulative distribution functions of the full vertical atmospheric attenuation of millimeter wave radio were obtained for the annual and monthly period using the developed radiometry tools, which provide an assessment of the reliability of high-speed terrestrial and terrestrial-satellite communication channels in Ukraine.

4. The mathematical model for evaluating the performance and interference resistance of the communication system was further developed, which is distinguished by taking into account the directional diagrams of base station antennas, phased antenna arrays (PARTs) of access points and user devices, which allows conducting research in conditions of dense urban development.

5. A new multi-beam model of propagation of MM wave radio (DW) for a indoor environments was developed; characterized by taking into account the dielectric characteristics of walls, floor and ceiling material, which allowed obtaining a theoretical estimate of the achievable data transmission speeds for the internal

corridors of the building (Indoor) of the information transmission network for the IEEE 802.11ad standard equipment using different modulation and coding schemes (MCS) and different types of antennas.

6. New data received on the energy potential of communication lines for open space (Outdoor) using the created experimental surface communication line based on the use of MikroTik Wireless Wire access points (RBwAPG-60ad kit) in the 60GHz (5mm) range, allowed and showed the feasibility of the deployment scenario of 5G networks in the 60 GHz range based on small cells (Small Cell).

The validity and reliability of the results of the dissertation work are ensured by the correct application of radiometric measurement methods, digital communication theory methods and confirmed by the agreement of the data of natural experiments and numerical calculations.

In the course of the dissertation work, the method of integrating tools and methods of remote monitoring of radiophysical and meteorological parameters of the atmosphere was used, which employ both active and passive sounding systems and which work in the near-infrared and millimeter wave ranges. The proposed methodology for solving the topical problem of assessing seasonal and regional differences in the transmission characteristics of MM band signals will be distinguished by methodological originality, aimed at achieving the goals of the NDR in a relatively short period of time with minimal material costs. The use of the most modern models, which describe the relationship between the meteorological parameters of the atmosphere and the characteristics of its physical fields, in combination with a complex of radiophysical equipment, should provide assistance in the description and explanation of a number of anomalous atmospheric phenomena, manifested in extreme fading or weakening of signals in MM communication lines radio wave range.

Personal contribution of the acquirer. The dissertation is the result of the author's scientific research. The main scientific results, which are given in the dissertation, were obtained by the applicant independently and are quite completely presented in 16 scientific works published by the applicant in co-authorship and

independently. In work [1], which the applicant carried out personally, an analysis of the technical architecture of the Mikrotik RBwAPG-60ad radio modems, which implement a hybrid (analog -digital) signal processing scheme, and the results of experimental studies of the performance of the communication channel of the millimeter wave range in the classroom (Indoor) are presented. The personal contribution of the recipient in the works published in co-authorship is as follows. In work [2], the applicant proposed implementing the communication component of the atmospheric research program on the level of attenuation of radio waves in the microwave frequency range by constructing an experimental ground communication line based on the use of MikroTik Wireless Wire access points (RBwAPG-60ad kit) in the 60 GHz range, which allowed obtaining new data on the energy potential of the communication line for the open space (Outdoor) and demonstrated the feasibility of the deployment scenario of 5G networks in the 60 GHz range based on small cells (Small Cell). The paper [3] presents the new results obtained by the dissertation student during the creation of an original software-hardware radiometric complex for the frequency of 40 GHz and the methodology of annual round-the-clock experimental research, which allowed, after appropriate statistical processing of the measurement results, to obtain data on the cumulative functions of the seasonal distribution of the full vertical atmospheric attenuation throughout the year and in the worst months of the year to ensure reliable communication in the considered frequency range. In the materials of the work [4], the applicant created an improved mathematical model for evaluating the productivity and readiness of the communication system, which is implemented as a computer program in the MATLAB environment, which allows determining the maximum radius of the service area and taking into account: system deployment scenarios, climate zone parameters, gas absorption, precipitation intensity, type of modulation scheme and coding (MCSi) equipment. The materials of the applicant's publication [5] continue the research topic, where the doctoral student supplemented the mathematical model, which allows to consider the directional diagrams of antennas of base stations, phased antenna arrays (PAA) of access points and user devices when assessing the

performance and interference resilience of communication systems in densely urbanized areas. In the article [6], the applicant received a theoretical assessment of achievable information transmission speeds for indoor building corridors of the information transmission network for IEEE 802.11ad standard equipment using various modulation and coding schemes (MCS).

Approbation of the results of the dissertation. The main results of the work were presented and discussed at the following scientific and technical conferences: 19, 20, 24 International Youth Forums "Radio Electronics and Youth in the 21st Century" (MRF Kharkiv, Ukraine, 2015, 2020); 4th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET, Lviv, Ukraine, 2018); 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT, Lviv, Ukraine, 2019); IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW, Kharkiv, Ukraine, 2020); IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON, Lviv, Ukraine, 2021); 17th International scientific and practical conference "System analysis and intelligent systems for management" (Ankara, Turkey, 2023).

The relevant scientific and practical problem of millimeter wave radio propagation is solved in the dissertation work. Cumulative distribution functions of the full vertical atmospheric attenuation of MM wave radio for the annual and monthly period were obtained, providing an assessment of the reliability of information-rich high-speed terrestrial-satellite communication channels in Ukraine. For the first time, the cumulative distribution functions of the surface linear attenuation of the CM and MM wave radio for the annual period and over the worst period of the year have been obtained. These functions are necessary for providing assessments of the readiness of prospective networks and terrestrial communication lines in Ukraine, which are distinguished by an increased degree of reliability. A new, improved model for obtaining the dependence of the transmission speed C on the length of the radio line of the communication system of the IEEE 802.11ad 60 GHz standard as a point-to-point (Indoor LOS, NLOS) was obtained. Additionally, calculations of the readiness of millimeter-range communication channels and their

performance evaluation, taking into account the microclimatic features of the region of Ukraine, have been conducted.

In the course of solving the specified problem, the following scientific and practical results were obtained:

1. The results of field trials of an experimental terrestrial communication line based on the use of MikroTik Wireless Wire access points (RBwAPG-60ad kit) in the range of 60GHz (5mm) have been obtained, which allows determining the maximum radius of the service area and considering system deployment scenarios, climate zone parameters, gas absorption, rainfall intensity, as well as type of modulation scheme and coding (MCSi) equipment.

2. In order to ensure round-the-clock monitoring and collection in automatic mode with a minute interval of measurements of radio-physical and meteorological data, the KhNURE developed a research methodology and manufactured a prototype of a ground-based radiometric complex, which includes a modulation radiometer of the 40 GHz (8 mm) range with a fluctuation sensitivity of 0.2 K and a weather station.

3. A software-hardware module was developed for connecting the detector circuit of the radiometer with a serial PC interface, which allows you to transfer measurement information directly to an Excel spreadsheet for database accumulation and processing.

4. A methodology for configuring the WinBox software application for managing devices based on Mikrotik RouterOS has been developed, which allows for the configuration of wireless access points for communication channel testing using a traffic generator. It enables setting connection parameters such as frequency range, signal strength, network interaction protocol (IP, UDP), the size of information packets, as well as visualizes the results of measuring the signal level at the receiver input, the type of signal modulation and coding, transmission speed parameters and connection quality.

5. The materials of the dissertation work are used in the educational process of the Kharkiv National University of Radio Electronics at the Department of Radio

Technologies of Information and Communication Systems in the lecture courses of "Newest directions of development of telecommunication and radio technical systems", "Radio transmitting devices" and "Radio receiving devices" in teaching students of educational and professional of the "Information Radio Technologies" program and in the preparation of master's attestation works, as stated in the corresponding act of implementation. (Act dated January 11, 2023, Kharkiv, Ukraine).

The obtained results allow the introduction of communication channels of a new generation in the city of Kharkiv, and having rainfall data in other regions of the country, calculations on the attenuation of millimeter wave frequencies can be easily performed.

A total of 16 scientific works were published on the topic of the dissertation, including 6 articles in leading scientific publications, 4 articles in specialized publications included in the list of scientific specialized publications of Ukraine approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine, and one article indexed in Scopus, worldwide scientific database. Additionally, 9 abstracts of reports were presented at international scientific conferences (including 4 in Scopus) and one patent for a utility model.

Key words: forecasting, millimeter wave range, antenna directivity diagram.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	25
Вступ.....	26
РОЗДІЛ 1 Аналіз стану питання та постановка задач дослідження.....	32
1.1 Перспективи розвитку безпроводових технологій передачі та необхідність переходу на використання міліметрового діапазону радіохвиль.....	32
1.1.1 Розвиток технологій передачі інформації в глобальному вимірі.....	32
1.1.2 Розвиток технологій передачі інформації нового покоління 5G.....	34
1.1.3 Основні критерії оцінки якості сервісів для систем зв'язку 5G.....	38
1.2 Огляд впливу клімату на поширення і загасання радіохвиль міліметрового діапазону	45
1.3 Характеристики опадів	52
1.3.1 Ослаблення в атмосферних газах.....	53
1.3.2 Прогнозування поєднання дощу і мокрого снігу.....	56
1.3.3 Масштабування.....	59
1.4 Поширення радіохвиль ММ діапазону в місті.....	60
1.5 Оцінка енергетичних характеристик каналу зв'язку.....	61
1.6 Модель яка використовується при моделюванні поширення радіохвиль.....	65
1.7 Постановка задач дослідження.....	72
Висновки до розділу 1.....	75
РОЗДІЛ 2 Оцінка продуктивності ліній зв'язку ММ діапазону	77
2.1 Математична модель оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку ММ ДХ	77
2.2 Оцінки продуктивності та завадостійкості системи зв'язку з урахуванням діаграм спрямованості антен базових станцій	87
2.3 Архітектура прямого перетворення, супергетеродинна архітектура	95
Висновки до розділу 2.....	97
РОЗДІЛ 3 Методичне забезпечення радіометрії атмосфери	99
3.1 Рекомендації ІТУ про поширення радіохвиль в атмосфері	99

3.1.1 Розподіл ослаблення через хмарність на похилих трасах на основі цифрових карт світу.....	100
3.1.2 Ослаблення через хмарність на похилих трасах на основі місцевих даних.....	102
3.2 Загасання в атмосферних газах	103
3.3 Кумулятивний розподіл	109
3.4 Умови технічного забезпечення та обмеження.....	111
3.5 Апаратно-методичне забезпечення та умови спостереження.	
Визначення характеристик повного вертикального ослаблення в атмосфері.....	113
Висновки до розділу 3.....	119
РОЗДІЛ 4 Розробка методики проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом	121
4.1 Радіометрична система для проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом	121
4.2 Програмний комплекс для побудови кумулятивної функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ діапазону ...	126
4.3 Розробка багатопроменевої моделі поширення радіохвиль ММ ДХ для закритого простору.....	144
Висновки до розділу 4.....	158
Висновки.....	160
Перелік джерел посилання.....	163
Додаток А Програма моделювання системи зв'язку міліметрового діапазону хвиль _OUTDOOR_Accesst в програмному забезпеченні MathLab	175
Додаток Б Програма моделювання системи зв'язку міліметрового діапазону хвиль _Corridor в програмному забезпеченні MathLab	180
Додаток В Програма моделювання системи зв'язку міліметрового діапазону _INDOOR_LOS в програмному забезпеченні MathLab	192
Додаток Г Програма моделювання системи зв'язку міліметрового діапазону _INDOOR_NLOS в програмному забезпеченні MathLab	200
Додаток Д Програма моделювання системи зв'язку міліметрового	

	25
діапазону_OUTDOOR в програмному забезпеченні MathLab	209
Додаток Е СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА	214
Додаток Є Довідки про практичне використання результатів дослідження	217

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ММ – МІЛІМЕТРОВИЙ

ДХ – Діапазон хвиль

ITU – International Telecommunication Union

ДНА – діаграма спрямованості антени

GSM – Groupe Special Mobile

LTE – Long-Term Evolution

WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access

СМ – сантиметровий

МСЕ – Міжнародна спілка електрозв'язку

AR – availability ratio

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

MCSi – Modulation and Coding Scheme

SC – Single carrier

OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій передачі інформації, стрімінгового відео, розвитку автопілотів в автомобілях та інтернету речей потребує все більших швидкостей бездротового зв'язку. Одним з рішень даної проблеми є впровадження п'ятого покоління зв'язку. З переходом на нові покоління використовують все більш високі діапазони частот, так як з підвищенням частоти зростає пропускна здатність радіоканалу. Чим вище діапазон, тим складніше побудувати стабільно працюючі радіоканали, тому що з підвищенням частоти зменшується довжина хвилі. П'яте покоління зв'язку працює у міліметровому діапазоні хвиль (ММ ДХ). У 2016 році обладнання 5G почало експлуатувати діапазони частот 28 ГГц у США та 39 ГГц у Європі, в Україні на жаль поки що функціонує тільки четверте покоління зв'язку, з появою нового обладнання планувалося задіяти і більш високі частоти, спочатку – до 60 ГГц, у перспективі – до 300 ГГц. Проведені дослідження в дисертаційній роботі важливі для стандартизації та ліцензування зв'язку п'ятого покоління в Україні. Оскільки стабільній роботі радіоканалу ММ ДХ заважають дощ, сніг, туман та інше. Міліметровий діапазон і є проблемою для швидкого введення цього стандарту в Україні. Так як великий вплив на загасання ММ ДХ мають опади, здебільшого дощ, потрібно мати довгострокову статистику кількості опадів, у кожному регіоні країни. Нема необхідних для таких розрахунків даних впливу метеорологічних даних в Україні. Без цих даних неможливо досить адекватно оцінити коефіцієнт готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль.

Актуальність роботи.

Розвиток сучасних телекомунікаційних мереж та систем пов'язаний з переходом в міліметровий діапазон радіохвиль (30-300ГГц) і впровадження технологій бездротового зв'язку 5G, що може забезпечити високошвидкісну передачу великих обсягів даних, створюючи нові сервіси та медіа послуги, такі

як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), розширена реальність (XR), Інтернет речей (IoT) та ін. Однією з головних особливостей використання міліметрового діапазону радіохвиль (ММ ДХ) є суттєве загасання в атмосфері за рахунок впливу різноманітних кліматичних факторів: вологи, дощу, снігу та газів атмосфери, а також те, що ці радіохвилі мають меншу здатність проникати через різні перешкоди, як будівлі та дерева.

Розвиток та впровадження перспективних засобів зв'язку 5G в Україні стримується відсутністю достовірних та актуальних даних про величини атмосферного послаблення радіохвиль міліметрового діапазону у вертикальному та горизонтальному напрямках, одержаних у безперервному режимі з малим часовим інтервалом, а також величин варіацій послаблення над різними регіонами нашої країни. Такого роду дані в значній мірі впливають на прогнозування коефіцієнту готовності\неготовності (availability performance) систем зв'язку, що проектуються, та на можливості прогнозування безперебійності каналу зв'язку, визначають вимоги до апаратурних параметрів інформаційно-комунікаційних систем. У ситуаціях відсутності цих даних Міжнародний союз електрозв'язку МСЕ (ITU - International Telecommunication Union) рекомендує проведення регулярних досліджень регіональних мікрокліматичних особливостей поширення і ослаблення радіохвиль.

В зв'язку з глобальними змінами клімату Землі саме такі дослідження проводяться в останні роки для визначення параметрів надійності та доступності мереж зв'язку ММ ДХ, що враховують регіональні, мікрокліматичні особливості в США, Японії, Англії і в інших країнах Європи. В Україні дослідження особливостей поширення радіохвиль сантиметрового та міліметрового діапазонів проводили провідні вчені Сундучков К.С. (НТУ «КПІ»), Кравчук С.О. (НТУ «КПІ»), Наритник Т.М. (НТУ «КПІ»), Руженцев М.В. (НАУ «ХАІ»), Павліков В.В. (НАУ «ХАІ»), Шокало В.М. (ХНУРЕ), а також вчені Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України.

Дисертаційна робота є продовженням реалізації програми «Проект спільних досліджень поширення міліметрових хвиль для українських перспективних ліній зв'язку 5G», яка була представлена провідними науковцями України на Міжнародній науково-технічній конференції (TCSET-2016). Основною ідеєю цього проекту є проведення експериментальних досліджень параметрів атмосферного послаблення радіохвиль ММ діапазону в одному з регіонів України (м. Харків) з високим часовим дозволом (1 хвилина та менше), оцінка точності і подальшого модельного опису отриманих даних, оцінка статистичних параметрів доступності ліній і мереж зв'язку в ММ ДХ та перенесення цього підходу на інші регіони України. Це дозволить оптимізувати технічні та фінансові витрати для впровадження 5G технологій в Україні.

Тому науково-прикладну задачу підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль з урахуванням мікрокліматичних факторів атмосфери для планування зон обслуговування систем зв'язку нового покоління 5G слід вважати актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота є продовженням реалізації програми «Проект спільних досліджень поширення міліметрових хвиль для українських перспективних ліній зв'язку 5G» яка була представлена у 2016 році провідними науковцями України на *9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*. Робота була виконана в період з 2018-2023 рр. на кафедрі радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем (РТІКС) Харківського національного університету радіоелектроніки в тому числі в рамках науково-дослідної роботи №334 на спеціальну тему (№ ДР 0121U000040Т). В рамках робіт, що виконувались відповідно до плану бюджетної НДР, автор був виконавцем одного з розділів програми робіт. Також отримані результати використовуються в навчальному процесі кафедри радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки при навчанні студентів освітньо-

професійної програми «Інформаційні радіотехнології» в рамках навчальних дисциплін: «Радіопередавальні пристрої» та «Радіоприймальні пристрої».

Мета і задачі досліджень

Метою дисертаційної роботи є удосконалення моделей оцінки продуктивності систем зв'язку та методів радіометричних досліджень характеристик атмосфери, що дозволять отримати інформацію про загасання сигналів міліметрового діапазону для підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону радіохвиль шляхом обґрунтованого врахування впливу на радіоканал мікрокліматичних факторів атмосфери.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні наукові задачі:

1. Проаналізувати стан проблеми методик отримання сукупного розподілу питомого загасання атмосфери.
2. Дослідити відомі методи розрахунку загасання ММ ДХ в опадах та у вільному просторі;
3. Отримати кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль для оцінки надійності інфо-ємних високошвидкісних наземно-космічних каналів зв'язку в Україні;
4. Удосконалити модель для отримання залежності швидкості передачі інформації C від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц та провести розрахунки готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону;
5. Провести аналіз розподілу приземного погонного ослаблення радіохвиль СМ та ММ ДХ за річних період для забезпечення оцінок готовності перспективних мереж та ліній приземного зв'язку в Україні;
6. Розробити метод побудови для розробки і експлуатації радіометричних систем ММ діапазону радіохвиль.
7. Проаналізувати існуючі методи оцінки продуктивності і готовності з

урахуванням кліматичних особливостей України.

8. Побудувати канал зв'язку з використанням комплекту точок доступу MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit). Та визначити втрати з прямою та непрямою видимістю.

При розробці стандарту нового покоління 5G виникають проблеми, що полягають в тому, що, канали передачі в ММ ДХ несе у собі багато труднощів при поширенні радіохвиль. До цих проблем можна віднести підвищене згасання сигналу ММ ДХ при поширенні в атмосфері і при проходженні через перешкоди (наприклад, будівлі), також присутні втрати у вільному прострі і найбільший вплив на сигнал здійснюють гідрометеори. З усіх цих причин ММ ДХ викликає складності при його освоєнні та використанні.

Вирішивши поставлені задачі можна отримати точні дані продуктивності та готовності каналів зв'язку ММ ДХ, та виходячі з отриманої інформації побудувати стабільно працюючі із заданим коефіцієнтом готовності та економічно вигідні радіолінії нового покоління.

Об'єкт дослідження – процес поширення радіохвиль ММ діапазону в атмосферних лініях зв'язку.

Предмет дослідження – моделі та методи оцінки загасання ММ ДХ в атмосфері, моделі визначення параметрів продуктивності та готовності каналів зв'язку швидкісної безпроводової мережі передачі інформації.

Методи досліджень – Використано методи: мікрохвильових кіл і теорії антен; математичне та імітаційне моделювання на ЕОМ; методи радіометрії атмосфери; методи математичної статистики; методи теорії цифрового зв'язку; методи натурального експерименту.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних наукових конференціях: 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT). (Львів, 2019 рік). 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (Харків, 2020).

Публікації.

Основні наукові положення та результати дисертації опубліковано у 21 наукових працях, з яких 1 патент на корисну модель, 6 статей у періодичних фахових виданнях України, а також 15 тези доповідей на міжнародних IEEE конференціях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science.

Структура дисертації та її обсяг.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, додатків, списку використаних джерел, що в загальному обсязі становить 215 сторінок, зокрема 162 сторінки основного тексту, 63 рисунків, 8 таблиць, 36 сторінок додатків та 105 найменувань використаних джерел.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даному розділі розглянуто перспективи розвитку безпроводових технологій передачі для України. Ослаблення ММ ДХ в різних умовах розповсюдження. Розглянута оцінка енергетичних характеристик каналів зв'язку. Представлені моделі та методи які використовувалися до нині та їх недоліки.

1.1 Перспективи розвитку безпроводових технологій передачі та необхідність переходу на використання міліметрового діапазону радіохвиль

1.1.1 Розвиток технологій передачі інформації в глобальному вимірі

Зараз у світі йде дуже стрімкий розвиток технологій які мають доступ до інтернету, обмінюються самостійно даними та завантажують зібрану інформацію в хмарні сховища. Щорічно кількість переданих даних від речей та людей в мережі інтернет складає приблизно 2 зеттабайтів. Зеттабайт це одиниця вимірювання кількості інформації 10^{21} (секстильйонів) байт. Об'єм інформації в мережі інтернет безперервно зростає. Згідно сервісу Internet Live Stats, кожену секунду в Google робиться більш 50 000 пошукових запитів, проглядається 120 000 відео на Youtube, відправляється майже 2,5 млн електронних листів.

Історія розвитку інтернету налічує вже декілька десятків років. У 1950-ті роки з'явилися перші концепції глобальної мережі. У 1960-ті почали з'являтися структуровані глобальні мережі на базі декількох локальних мереж. У кінці шестидесятих на початку семидесятих розроблені мережі пакетної комутації - ARPANET, NPL, Telenet, Merit Network, Cyclades і Tymnet. У 1967 Дональд Девіс представив нову модель пакетної комутації, яка стала платформою для подальших розробок на два десятка років. У 1970-ті Вінтон Серф і Роберт

Елліот Кан на основі розробок ARPANET і Cyclades налагодили стек протоколів TCP / IP. На початку 80-х NSF ініціює створення обчислювальних центрів в університетах, а в 1986 році вони були об'єднані в мережу в рамках проекту NSFNET в США. До кінця десятиліття почали з'являтися перші інтернет-провайдери. Тоді ж виникає вже звична нам глобальна мережа всесвітньої павутини - на основі розробок британця Тіма Бернеса-Лі, що працює в Швейцарії. Вчений об'єднав безліч гіпертекстових документів в єдину систему, до якої можна підключитися з будь-якого технічного вузла загальної мережі. У 1990 році проект ARPANET закривається. В окремих американських містах починають з'являтися приватні підключення до Інтернету, що надаються приватними комерційними організаціями. У 1995 році закривається проект NSFNET. Після цієї події інтернет стає виключно комерційним, а мережевий трафік - доступний для покупки звичайними користувачами. І саме у 90-ті інтернет почав мати великий вплив на сфери життя людини.

Разом з великим інтернетом також розвивається мобільний інтернет. Зараз майже у кожного в світі є мобільний телефон, у деяких людей по два і більше. Перше покоління зв'язку з'явилося у 80-ті роки. Ці системи були аналоговими. Розвиток мереж мобільного інтернету почався з другого покоління. Європейський інститут по стандартизації в галузі телекомунікацій спроектував GSM (Groupe Special Mobile) як рішення, яке відкриє нові можливості голосової телефонії. Але тоді ще ніхто не замислювався про те, що GSM може знадобитися для масового використання інтернету. Саме у другому поколінні зв'язку передача інформації стала цифровою. Це дозволило розвинути основні функції смартфонів.

Третє покоління 3G стало проривом у розвитку мобільного інтернету. Воно дало нам перший високошвидкісний доступ до мережі. Саме зростання кількості користувачів мобільними телефонами дало поштовх для розвитку 3G, так як друге покоління вже не могло справлятися з потребами абонентів. 3G представили в Японії у 2001 році. І саме 3G дав розвиток мобільної індустрії. Завдяки швидкому підключенню почали розвиватися послуги потокового відео

на телефоні, відеодзвінки, які стали дуже актуальні у 2020 році що дало поштовх для розвитку дистанційного навчання. І в наш час не обов'язково жити у великому місті для отримання якісної освіти. У 2000-х більшість сайтів розробили версії для мобільних пристроїв. З середини 2000-х третє покоління мобільного зв'язку сильно змінило веб-індустрію. Сучасна епоха смартфонів як кишенькових комп'ютерів розвилася з приходом 3G, особливо у 2005 році, коли у 3G була впроваджена технологія пакетної передачі даних High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA). Однак в 2009 році стало ясно, що в якийсь момент мережі 3G будуть перевантажені трафіком від додатків, яким необхідний доступ в мережу Інтернет. Незабаром індустрія зосередилася на впровадженні технологій 4G, маючи намір збільшити швидкість в кілька разів порівняно з існуючими мережами 3G.

Перші технології 4G були представлені в США (WiMAX заснована на стандарті IEEE 802.16, пропускна здатність однієї базової станції при шести секторах і ширині смуги пропускання 20 МГц становить 180 Мбіт/с) і Скандинавії (у LTE пропускна здатність досягає 326,4 Мбіт/сек в сторону абонента і 172,8 Мбіт/с в сторону базової станції) [6].

У короткій боротьбі технологія WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) поступилася LTE (Long-Term Evolution). Обидва стандарти умовно відносяться до четвертого покоління зв'язку (4G).

Технологія 4G практично зрівняла швидкість мобільного інтернету і домашнє широкопasmове підключення через кабельні канали зв'язку. Існуючий загальний стандарт визначає 4G як мережу, в якій 100 Мбіт/с надається для абонентів, що знаходяться в русі, і до 1 Гбіт/с в ідеальних умовах (абонентський пристрій рухається). При цьому затримка коливається в межах від 20 до 50 мс [7].

1.1.2 Розвиток технологій передачі інформації нового покоління 5G

Отже ми підійшли до п'ятого покоління зв'язку яке буде працювати у

міліметровому діапазоні, головним чином завдяки його широкосмуговості. ММ ДХ викликає інтерес для побудови каналів зв'язку п'ятого покоління [8,9,10]. В 2020 році кількість унікальних користувачів інтернету складає 4,54 мільярда, а кількість людей що використовує мобільний інтернет складає 5,19 мільярда. Також потрібно не забувати про інтернет речей. Кількість пристроїв на 2019 рік складає 22 мільярди, що набагато більше ніж кількість людей у світі. Аналітики очікують, що у 2025 році кількість IoT – пристроїв досягне 38,6 мільярдів, а у 2030 році інтернет речей перевищить відмітку в 50 мільярдів пристроїв [11]. 5G у світі вже активно впроваджується, на жаль в Україні ця технологія масово ще не застосовується. Згідно з дослідженням компанії VIAVI, мережі 5G вже працюють в 378 містах з 34 країн світу. Визнаних країн в світі 197. Особливості поширення сигналів ММ ДХ постійно досліджуються, розроблюються нові підходи до обчислень [12...16].

Так чому п'яте покоління так повільно впроваджується у світі? Якщо в Китаї вже працює 5G чому в Україні його немає? А якщо у Китаї є 5G то чого у такій малій кількості міст? Зважаючи що 5G працює у міліметровому діапазоні це легко пояснити. На міліметровий діапазон великий вплив мають опади такі як дощ, мокрий сніг. Клімат України дуже відрізняється від Китаю, так само як і клімат у містах однієї країни відрізняється. Тобто якщо ми візьмемо розрахунки для Китаю то 5G у нас в одних випадках коректно працювати не буде, а в інших мережа не буде оптимізована з погляду матеріальних витрат. Спочатку нам потрібно отримати багаторічні дані кількості опадів, а потім по цим даним розрахувати готовність каналу зв'язку, і вже маючи ці дані будувати лінії зв'язку п'ятого покоління. І навіть розрахувавши готовність каналу зв'язку для міста Харкова ми не зможемо застосувати ці дані для побудови 5G, наприклад, у місті Львові або м. Одесі. Там потрібно проводити свої виміри кількості опадів та інших мікрокліматичних факторів для даного регіону України.

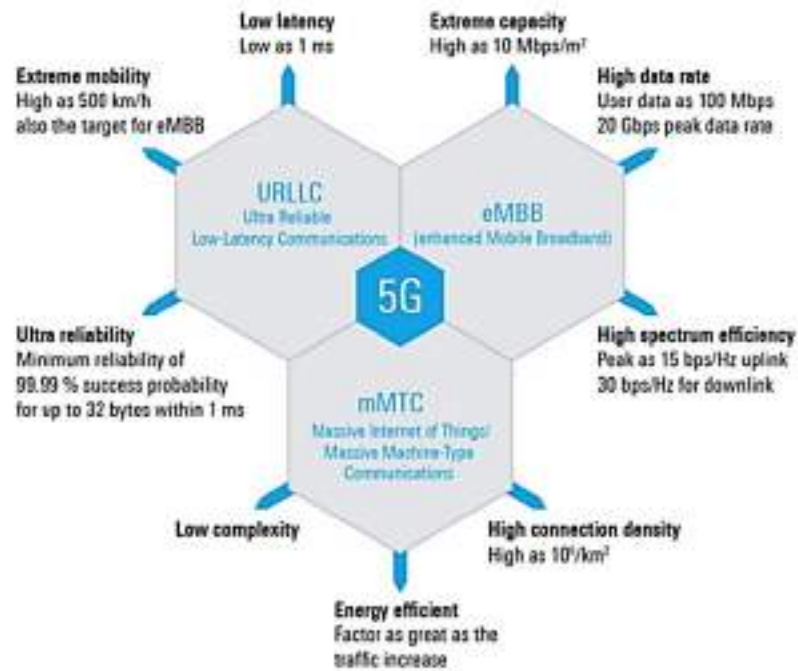


Рисунок 1.1 – Сценарії розгортання технологій 5G для ІМТ-2020 [1]

Мікрохвилі – це електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі в діапазоні від 1 м до 1 мм і частотах в діапазоні від 300 МГц до 300 ГГц [17, 18]. Вони були розділені ІТУ на 4 піддіапазони, і на 12 піддіапазонів за IEEE відповідно до «смуги частот» [19]. Кожен діапазон має різне і конкретне застосування.

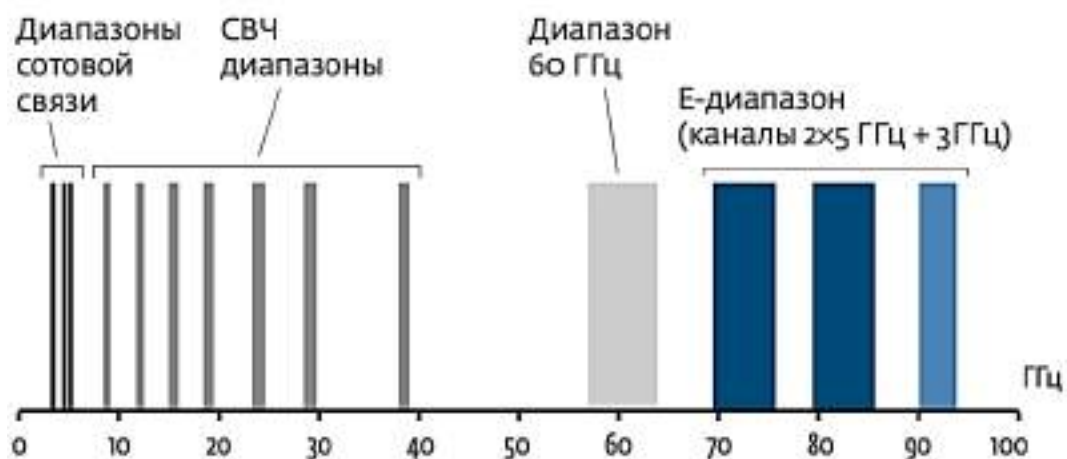


Рисунок 1.2 – Основні частотні діапазони безпроводового зв'язку

Завдяки широкій смузі пропускання, доступній на частоті ММ хвиль, стільниковий зв'язок може використовувати смугу пропускання каналу 1 ГГц

або більше. Діапазони частот 28, 38 і 70...80 ГГц здаються дуже сприятливими для використання в стільникових системах наступного покоління [20].

Як уже було сказано міліметровий діапазон викликає інтерес із за впровадження мереж 5G, а також інфоємних та високошвидкісних систем наземного та наземно-космічного зв'язку. Затримки у мережі які передбачаються 1 м/с [21]. Україна не є винятком. До перспективних технологій побудови 5G та її реалізації є малі базові станції, які являються аналогами звичайних базових станцій мобільної мережі. У межах населених пунктів малі базові станції повинні розташовуватися на невеликих відстанях одна від іншої (приблизно 250 метрів). З таких параметрів можна зробити висновки що для покриття одного навіть невеликого міста потрібно буде використати тисячі таких станцій, які будуть формувати єдину мережу яка буде передавати дані користувачам 5G. З плюсів можна відмітити що завдяки малим розмірам антен їх можна буде без додаткових завад розміщувати на любых елементах конструкцій та споруд (наприклад на стінах будинків, стовпах та інше). Також ММ хвилі застосовуються в системах зв'язку та телекомунікаційних системах [22], навігаційних системах, ближньої та дальньої радіолокації [23], у приладах медичного призначення [24].

Також з переваг малих базових станцій є більш ефективне використання радіочастотного спектру. Із за малої області покриття малих станцій одну і ту ж виділену частоту є можливість використовувати для обслуговування різних клієнтів декількома розташованими недалеко одна від іншої антенами. Але і без недоліків тут не обійшлося, із за необхідності використання великої кількості базових станцій може бути недоцільно розгортати мережу п'ятого покоління у невеликих містах та селах нашої та інших країн світу.

1.1.3 Основні критерії оцінки якості сервісів для систем зв'язку 5G

Параметри безпроводової мережі, які запропонують системи 5G, будуть досить привабливими для реалізації нових послуг та сервісів. Це покоління

зосередилося на вдосконаленій архітектурі системи, що базується на мережах технології IP.

Рекомендації МСЕ-Т E.802 містять принципи та методики визначення критеріїв якості сервісів (*QoS – quality of service*), актуальних для користувачів, та керівні принципи перетворення цих критеріїв у параметри QoS, які можуть бути використані для оцінки QoS послуг електрозв'язку. Також тут представлені керівні принципи визначення вимог до QoS, що пред'являються користувачами, і встановлення пріоритетів критеріїв або параметрів. Всі ці принципи можуть застосовуватися до послуг, що підтримуються традиційними наземними та бездротовими мережами, а також підтримуються IP-мережею, що розвивається.

Якість (quality): Сукупність характеристик об'єкта, які зумовлені його здатністю задовольняти заявлені потреби. Характеристики повинні бути спостерігаються та піддаються вимірюванню. Якщо параметри визначені, вони стають параметрами, і параметри виражаються в одиницях виміру.

Якість обслуговування (quality of service): Сукупність характеристик послуги електрозв'язку, які зумовлені його здатністю задовольняти заявлені потреби користувача послуги. Сумарний ефект характеристик обслуговування, який визначає рівень задоволеності користувача даною послугою.

У Рекомендації МСЕ-Т E.802 представлені три моделі визначення **критеріїв QoS** для будь-яких послуг електрозв'язку. Усі ці моделі або їх поєднання можуть використовуватися для визначення більшої частини, якщо не всі, критеріїв QoS будь-якої послуги. Для конкретного призначення зі списку визначених критеріїв може бути обраний набір конкретних критеріїв QoS. Приведені керівні принципи перетворення визначених критеріїв у піддані вимірюванню параметрів QoS, а також порядок адаптації та вимірювання цих параметрів.

Управління QoS можна пояснити шляхом чотирьох застосувань поглядів на QoS. Ці погляди охоплюють усі аспекти QoS – з точки зору постачальника та послуг користувача (або клієнта). Чотирьома поглядами на QoS:

- вимоги до QoS клієнта;
- запропоноване постачальником послуг QoS (або плановане/цільове QoS);
- досягаємо або забезпечуємо QoS;
- сприйняття клієнтом QoS (оцінки QoS за результатами досліджень).

Перелік основних критеріїв QoS:

Швидкість (Speed): Критерій характеристики роботи, що описує інтервал часу, необхідний для виконання тієї чи іншої функції, або швидкість, з якою виконується ця функція. (Ця функція може виконуватися або не виконуватиметься із заданою точністю).

Готовність (Availability): Готовність елемента знаходитися в стані, необхідному для виконання необхідних функцій у заданий момент часу або в будь-який момент часу в заданий проміжок часу, виходячи з прогнозу про те, що зовнішні ресурси, якщо такі необхідні, надані.

Надійність (Reliability): вірогідність функціонування продукту або системи відповідно до вимог протягом певного періоду часу. Спроможність елемента виконувати вимогу в умовах даного періоду часу.

Точність (Accuracy): Критерій характеристики роботи, що описує ступінь бездоганності, з якою виконується якась функція. (Ця функція може працювати або не виконуватиметься із заданою швидкістю.)

Захищеність (Security): це захист доступності, цілісності та конфіденційності інформації.

Простота (Simplicity): Легкість і відсутність складності в інтересах користувача якої-небудь функції конкретної послуги.

Гнучкість (Flexibility): Ступінь змінності функціонування в межах технічних і експлуатаційних характеристик даної послуги.

Далі розглянемо визначення деяких основних параметрів QoS, які характеризують впровадження нових безпроводових технологій передачі інформації 5G для реалізації високошвидкісної каналів передачі великих обсягів даних, створюючи нові сучасні сервіси та медіа послуги, такі як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), розширена реальність

(XR), Інтернет речей (IoT) тощо.

Пропускна здатність каналу зв'язку.

У 1948 році у статті К. Шеннона «Математична теорія зв'язку» було дано відповідь на питання про вихідне кодування, кодування каналу та пропускну здатність каналу, закладаючи основу обробки сигналів і техніки зв'язку.

Однією з найважливіших теорем у теорії телекомунікацій є теорема Шеннона Хартлі, яка стверджує, що максимальна пропускна здатність каналу (C) (біт/с) залежить від ширини смуги пропускання каналу (B) і його співвідношення сигнал/шум $S/N(SNR)$ в каналі зв'язку

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [\text{біт/сек}], \quad (1.1)$$

Шеннон показав, що пропускна здатність каналу C з адитивним білим гаусовим шумом (*Additive White Gaussian Noise – AWGN*) є функцією середньої потужності прийнятого сигналу S , середньої потужності шуму N і ширини смуги пропускання B .

Якщо B вимірюється в герцах, а логарифм береться на підставі 2, то пропускна здатність матиме розмірність *біт/с*. Теоретично (при використанні досить складної схеми кодування) інформацію по каналу можна передавати з будь-якою швидкістю зі скільки завгодно малою ймовірністю виникнення помилки. В роботі Шеннона показано, що величини S , N і B встановлюють межі швидкості передачі, а не ймовірності появи помилки. Графічне представлення доступних меж продуктивності прикладних систем (*Shannon Limit*) показано на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Залежність нормованої пропускної спроможності каналу від SNR каналу

Цей графік показаний представляє нормовану пропускну здатність каналу C/W в $бим/с/Гц$ як функцію відношення сигнал/шум (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) в каналі зв'язку.

Насправді пропускну здатність каналу, який спостерігає кінцевий користувач, залежить від багатьох таких факторів, як відстань між базовою станцією та терміналом, розміру стільникової соти, особливості самого пристрою, швидкістю руху, наявністю перешкод та шумів, кількості користувачів, що підключені до однієї соти мережі.

Відповідно до рівняння (1.1) Шеннона-Хартлі QoS у користувачів на краю радіуса покриття стільникової мережі, отримують гірше співвідношення сигнал/шум, ніж користувачі із з'єднанням прямої видимості (*Line-of-Sight* – LOS) . Отримання кращого або гіршого співвідношення сигнал/шум безпосередньо впливає на модуляційну схему, яка буде використовуватися для передачі даних. Тобто користувачі з гіршим SNR будуть використовувати схема модуляції з меншою кількістю бітів на символ, тоді як користувачі з хорошою SNR використовуватиме більшу кількість бітів на символ.

Формула пропускної здатності каналу в теорії інформації К. Шеннона визначила верхню межу швидкості передачі інформації в каналі з додатковим шумом. Але поки що незважаючи на швидкий розвиток телекомунікаційних технологій ще не наблизилися до цієї теоретичної межі. Проте в даний час дослідження сучасних комунікаційних технологій зосереджено на техніках кодування та вдосконалення фундаментальної методики модуляції сигналів, що може надати можливість наблизитися до межі Шеннона (*Shannon Limit*) або навіть подолати її.

Коефіцієнт готовності (AR) та коефіцієнт неготовності (UR)

Термін «готовність», що позначається як *AR (Availability Rate)*, це частка часу протягом періоду спостереження, коли тракт зв'язку знаходиться в стані готовності. *AR* обчислюється шляхом розподілу загального часу готовності під час спостереження тривалість періоду спостереження.

Величина *UR*, яка є зворотною величиною *AR*, це частка часу протягом періоду спостереження, коли наскрізний тракт зв'язку знаходиться в стані неготовності *UR (Unavailability Rate)*, обчислюється шляхом поділу загального часу неготовності під час спостереження тривалість періоду спостереження.

$$AR + UR = 1. \quad (1.2)$$

Період спостереження рекомендується брати один рік. Якщо дане з'єднання не планується як постійне з'єднання, то в цьому випадку періоди, коли з'єднання не експлуатується, не враховується при розрахунку його готовності. У цьому розділі наведено декілька прикладів застосування цієї Рекомендації до реальних ліній з метою визначення значень показників. У розрахунках передбачається, що рік відповідає 525 960 хв.

Показники готовності, що застосовуються для кожного напрямку лінії зв'язку довжиною L_{link} , можна визначити використовуючи рівняння (1,3).

$$AR = 1 - (B_j \frac{L_{link}}{L_R} + C_j), \quad (1.3)$$

Довжина еталонної лінії зв'язку $L_{link}=2500$ км.

Наприклад: для національної ділянки доступу завдовжки 30 км.

Довжина менша за $L_{min} < 50$ км, тому використовувалося значення $L_{link}=50$ км.

$$AR = 1 - \left(B_5 \frac{L_{link}}{L_R} + C_5 \right) = 1 - \left(0 \frac{50}{2500} + 5 \times 10^{-4} \right) = 0,9995. \quad (1.4)$$

Ці значення відповідають $AR=99,95\%$ (неготовність становить 263 хв./рік).

При плануванні мережі чи окремого прольоту для розрахунку коефіцієнта доступності необхідно враховувати кліматичну зону, де доведеться працювати. Наприклад, для європейської частини України (регіон E) максимальна довжина прольоту за коефіцієнта доступності 99,995 становитиме близько 3–4,5 км, тоді як у деяких районах Середньої Азії чи Африки довжина прольоту може досягати 10–15 км.

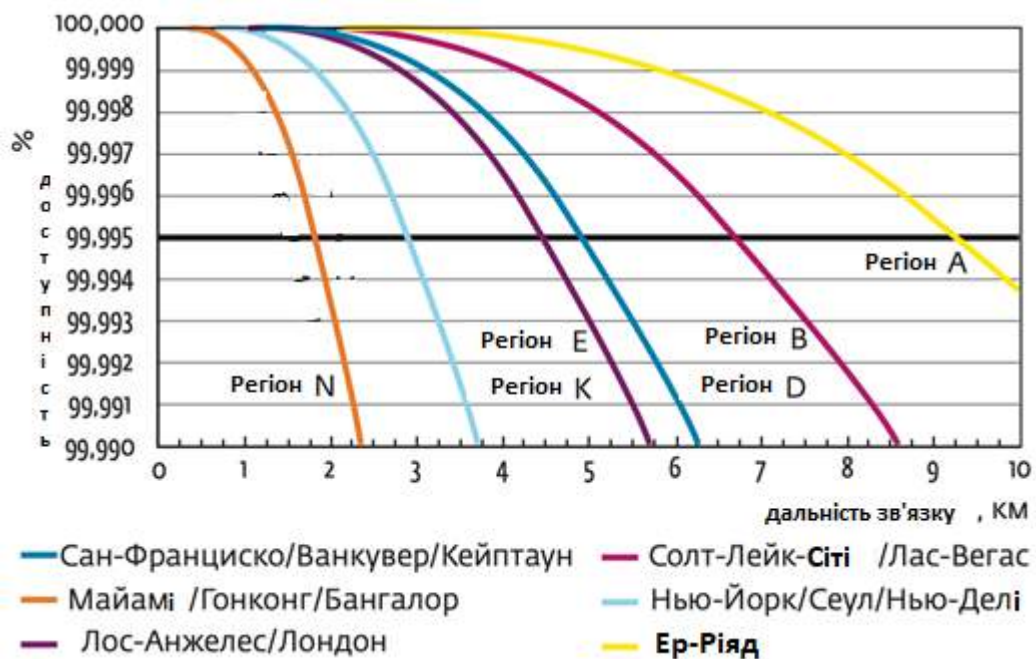


Рисунок 1.3 – Залежність між коефіцієнтом доступності та дальності зв'язку для різних дощових регіонів ITU-R для апаратури E-Link 1000 (E-band Communications) (діаметр антени 61 см, швидкість передачі даних 1250 Мбіт/с)

Сильний розкид максимальної довжини прольоту всередині дощового регіону залежить від технічних характеристик конкретної апаратури. Отже важливим моментом, що передує плануванню мережі є вибір обладнання. Особливу увагу слід приділити, звичайно, загальній енергетиці системи. Але

важливу роль відіграють і сервісні можливості – такі як автоматичне вимкнення портів трафіку основного каналу при перевищенні заданого порога помилок. Це необхідно для коректної роботи зовнішніх комутаторів, які за відсутності несучої від системи зв'язку переведуть трафік на резервний напрямок. Дуже важливою є наявність віддаленого управління та моніторингу. Також слід звернути увагу на рекомендовану виробником мінімальну відстань між вузлами. У зв'язку з сильним загасанням сигналу ММ-діапазону, варіація рівня сигналу в приймачі в залежності від дальності зв'язку може лежати в діапазоні (40-90)дБ. Тому для її компенсації можуть виявитися недостатніми динамічний діапазон автоматичного регулювання посилення (АРП) приймача та автоматичного регулювання потужності передавача. В результаті, враховуючи прагнення виробників оптимізувати роботу апаратури під максимальну відстань, на дистанції до (100–200) м приймач буде критично перевантажений.

Надійність (*Reliability*) – це міра, яка використовується для характеристики належної роботи компонента/системи відповідно до своїх специфікацій протягом певного періоду часу. Формально це визначається як ймовірність того, що компонент не вийде з ладу протягом інтервалу часу $(0, t]$. Беручи до уваги, що час до відмови компонента, T , є випадковою величиною, визначеною інтегральною функцією розподілу $F(t)$ (CDF), надійність $R(t)$ визначається як

$$R(t) = Pr(T > t) = 1 - F(t). \quad (1.5)$$

Функція надійності тісно пов'язана з функцією інтенсивності відмов $\lambda(t)$. Ця функція (також відома як рівень небезпеки) описує миттєву частоту відмов компонента. Формально ця функція визначається як ймовірність того, що компонент виходить з ладу протягом періоду часу $[x, x + \Delta t]$, знаючи, що він працює в момент часу $t = x$. Для багатьох систем/компонентів ця функція представляє характерну форму, подібну до кривої ванни. Коли система молода, рівень відмов вище, а потім швидко знижується, поки не стабілізується (термін корисного використання). Коли система/компонент старіє, він знову збільшується (зношується). Для електричних/електронних систем прийнято

вважати, що інтенсивність відмов є постійною протягом періоду корисного використання, тобто $\lambda(t) = \lambda$. Можна довести, що $R(t)$ та $\lambda(t)$ пов'язані таким виразом

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(u)du\right). \quad (1.6)$$

Різноманітні технічні документи галузі, описують багатогранну 5G система, яка здатна одночасно підтримувати кілька комбінацій надійності, затримки, пропускної здатності, позиціонування та доступності. Ця технологічна революція можлива завдяки впровадженню нових технологій як у доступі, так і в ядрі системи, таке як гнучкість, масштабоване призначення мережевих ресурсів.

Система 5G повинна підтримувати суворі QoS вимоги для затримки, надійності, пропускної здатності тощо. Удосконалення радіоінтерфейсу теж сприяє досягненню цих ключових показників ефективності, як і вдосконалення базової мережі, такі як компоновку мережі.

Система 5G також підтримує нові бізнес-моделі, такі як IoT та корпоративні керовані мережі, керування безпілотним літальним апаратом (БПЛА), доповнена реальність (AR) і заводська автоматизація. Покращення гнучкості мережі підтримують автономні корпоративні мережі, які встановлюються та обслуговуються мережевих операторів під час керування підприємством. Покращені режими підключення та покращена безпека полегшують підтримку масового IoT, який, як очікується, включатиме десятки мільйонів UE, які надсилають і отримують дані через мережу 5G.

1.2 Огляд впливу клімату на поширення і загасання радіохвиль міліметрового діапазону

Як уже було сказано у підрозділі 1.1, великий вплив на поширення радіохвиль міліметрового діапазону здійснюють опади та деякі типи хмарного покриву. У більшості дощ, так як довжина хвилі співпадає з розмірами крапель дощу [25...28].

Якщо з побудовою каналів зв'язку у міліметровому діапазоні хвиль так багато проблем то навіщо взагалі у ньому працювати? Тому спочатку розглянемо переваги діапазону окрім високої швидкості передачі даних:

- висока заводо захищеність від індустриальних ЕМ – завод;
- малі розміри антен;
- із за малих розмірів антен на них зменшується вітрове навантаження, а це підвищує надійність системи;
- отримання вузьких діаграм спрямованості;
- так як антени використовують вузькі діаграми спрямованості, це зводить на нуль взаємовплив між сусідніми базовими станціями;
- малі кути передаючих променів, це дає високу енергетичну скритність систем;
- швидкість передачі даних 10 Гбіт/с, а в перспективі і більше, а це у два рази більше ніж у існуючих радіосистем.

Всі ці переваги приваблюють розробників всього світу переходити на ММ ДХ.

Загасання радіохвиль у тропосфері буває двох видів, це резонансне та нерезонансне загасання. Резонансне загасання обумовлене властивістю молекул поглинати електромагнітні хвилі та електромагнітне поле власних спектрів випромінювання. Частота електромагнітної хвилі співпадає з однією із дискретних частот внутрішньо молекулярних квантових енергетичних рівнів, таким чином відбувається поглинання енергій. Зворотній перехід з більш високого енергетичного рівня на більш низький супроводжується випромінюванням електромагнітних квантів на власній резонансній частоті, яке є одним з полів шумів в радіодіапазоні.

Нерезонансне загасання обумовлене тепловими втратами енергії при поширенні електромагнітної хвилі в різних метеорологічних умовах. Під цими умовами маються на увазі гідрометеори (дощ помірної і великої інтенсивності, туман), хмари і інші метеорологічні явища в нижніх шарах тропосфери. Ослаблення в опадах особливо істотно позначається на частотах понад 10 ГГц,

що можна побачити на рисунку 1.4 [29,30].

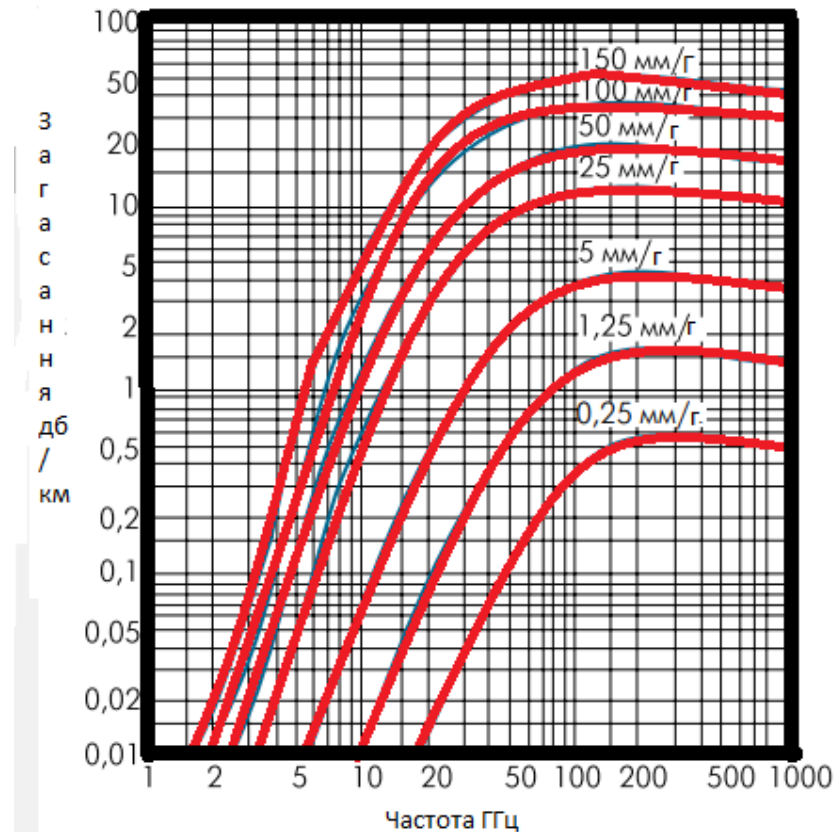


Рисунок 1.4 – Залежність погонного загасання від частоти сигналу і інтенсивності опадів

На ММ ДХ впливає все що є в атмосфері: дощ, сніг, туман, пил та інше.

Величину погонного загасання сигналу 60 ГГц в дощі γ_R , залежно від інтенсивності опадів R [мм/год], можна визначити, використовуючи графіки, представлені на рисунку 1.4 [31]. На графіку пунктиром показані рівні загасання γ_R [дБ/км] в дощі.

Очікувані дальність і коефіцієнт доступності лінії розраховуються на підставі типових даних про інтенсивність опадів для конкретного регіону (карти/таблиці дощових зон). Для кожного регіону, міста тощо модулюються різні канали зв'язку залежно від ландшафту, щільності будівель, дерев і інших можливих перешкод. Це допомагає здійснити максимально сприятливі умови для передачі інформації і дальності відстані, а також мінімальні втрати і

загасання міліметрового діапазону хвиль. На рисунку 1.5 представлена ІТУ карта кліматичних зон світу. При цьому ІТУ вважає кращим для окремих регіонів світу використання даних безпосередніх статистичних вимірювань, а у разі їх відсутності пропонує наближені моделі, на підставі яких побудована ця карта.

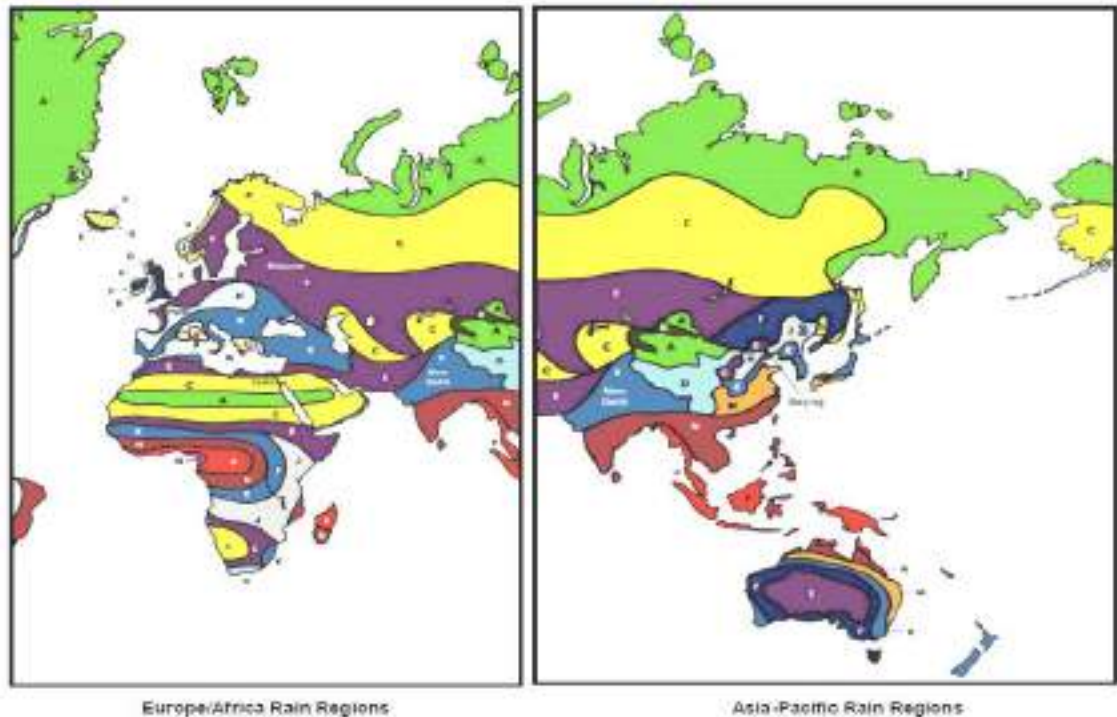


Рисунок 1.5 – Карта кліматичних зон світу [32]

Як уже було сказано, та беручі до увагу наведену карту, можна зробити висновки, що при плануванні мережі або окремого прольоту для розрахунку коефіцієнта доступності ліній зв'язку необхідно враховувати кліматичну зону, в якій доведеться працювати. Сильний розкид максимальної довжини прольоту всередині дощового регіону залежить від технічних характеристик вже конкретної апаратури. Тому ще раз зауважимо що важливим моментом, при плануванні, мережі є вибір обладнання. Особливу увагу слід приділити, звичайно, загальній енергетиці системи [33].

При побудові ліній зв'язку міліметрового діапазону необхідно приділити увагу питанням обліку неоднорідності дощу на трасі поширення, що особливо важливо при розрахунку ліній зв'язку Земля-Космос. Навіть при слабких дощах

створюване ними ослаблення досить велике.

Ослаблення радіохвиль міліметрового діапазону в тумані залежить від кількості рідкої води в одиниці його обсягу, а також від його температури [34].

Так само ускладнює розробку теоретичних моделей різноманіття форм випадання снігу і сильна залежність поглинання радіохвиль міліметрового діапазону від вологості снігу.

Із усього приведеного вище ми бачимо що на міліметровий діапазон радіохвиль впливає дуже багато різних факторів. І для кожного з цих факторів потрібен свій підхід для вирішення проблеми. Тому для покращення систем зв'язку базові станції потрібно встановлювати на близькій відстані одна від одної.

Не маючи свіжих даних про опади, ми не можемо розрахувати точні показники готовності ліній зв'язку міліметрового діапазону. Це направлення в науці дуже перспективне у всьому світі тому що перейшовши до мереж 5G ми зможемо передавати великі кількості інформації з дуже великою швидкістю.

Міліметрові хвилі – частотний діапазон радіохвиль з довжиною хвилі у вільному просторі від 1 до 10 мм, що відповідає радіочастотам від 30 до 300 ГГц [35,36]. Міліметрові хвилі дозволяють передавати цифрові дані з дуже високою швидкістю. У міліметровому діапазоні вона може досягати 10 Гбіт/с і більше. Перевагою діапазону є велика абсолютна смуга частот. Але якщо їх порівнювати з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі міліметрового діапазону мають сильне загасання при поширенні в земній атмосфері. Через це земні радіосистеми міліметрового діапазону характеризуються малою дальністю дії [37,38].

У наш час міліметровому діапазону хвиль постійно знаходять більше і більше нових областей та методів використання. З областей використання міліметрового діапазону хвиль можна відзначити концентратори бездротових базових станцій, РЛС ближньої дії і сканери в аеропортах. В радіоастрономії міліметровий діапазон використовується для дистанційного зондування землі. Міжнародний союз електров'язку використовує частоти 57...59,3 ГГц для

моніторингу атмосфери для метеорологічних додатків і для спостереження за кліматом. Локальний максимум ослаблення доводиться на частоту 60 ГГц. Устаткування діапазону 60 ГГц можливо використовувати тільки на відносно невеликих відстанях (не більше 1...1.5 км). Високе кисневе поглинання на цих частотах з одного боку є недоліком, що значно обмежує дальність зв'язку. З іншого боку даний ефект забезпечує високу електромагнітну сумісність і можливість використання на одній території великої кількості РЕЗ з повторним використанням частот.

У наш час для збільшення протяжності ліній зв'язку становлять інтерес «вікна прозорості» атмосфери на частотах 35, 94, 140, 220 ГГц, в яких спостерігається мінімальне загасання порівняно з сусідніми ділянками міліметрових хвиль [39]. На середніх широтах при помірній вологості і температури повітря в ясну погоду влітку у земної поверхні повне ослаблення не велике і при вертикальному поширенні через атмосферу на частоті 94 ГГц не перевищує 1,3 дБ. У вікнах прозорості атмосфери на приземних лініях зв'язку міліметрові хвилі найбільше ослаблення відчувають в опадах. Викликано це двома причинами: по-перше, тим, що характерні розміри крапель того ж порядку, що і довжина хвилі випромінювання, через що дифракційне розсіювання краплями носить резонансний характер; по-друге, тим, що великі значення уявної частини комплексного показника заломлення води, обумовлюють високий рівень поглинання енергії хвилі в обсязі краплі [40]. Розміри крапель можна дізнатися за допомогою дистанційного вимірювання розмірів крапель води за допомогою двохчастотного зондування [41].

Вплив на поширення та розсіювання міліметрових хвиль в опадах на роботу приземних ліній зв'язку може бути вкрай несприятливим, оскільки воно призводить до погіршення умов електромагнітної сумісності ліній зв'язку між собою і з іншими радіоелектронними системами, зменшує скритність передачі інформації, створює електромагнітні перешкоди різним службам, порушує екологію навколишнього середовища. На рисунку 1.6: приведено загасання сигналу в навколишньому середовищі на різних частотах у різних видах опадів.

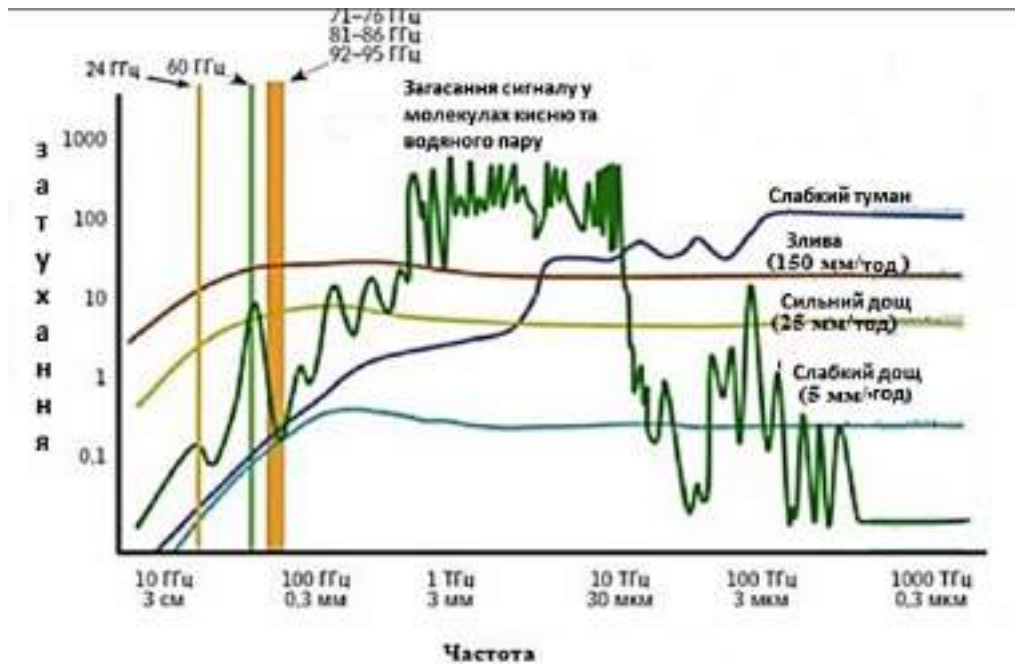


Рисунок 1.6 – Загасання сигналу в навколишньому середовищі

Використання обладнання міліметрового діапазону можливо тільки на трасах з прямою оптичною видимістю [42]. У системах «точка-точка» використовуються гостроспрямовані антени з високим коефіцієнтом посилення, поширення радіохвиль при цьому подібно лазерному променю. При плануванні необхідно враховувати всі можливі перешкоди як на лінії між антенами приймачів, так і в першій зоні Френеля. Пил, туман, дим і інші дрібнодисперсні суспензії з розміром частинок значно менше 3 мм не перешкоджають поширенню хвиль міліметрового діапазону. Основними недоліками міліметрового діапазону є: залежність від погодних умов, необхідність точного юстирування антен [43].

Як уже було сказано, для покриття в місті можуть знадобитися тисячі таких станцій, які формують єдину «релейну» мережу для передачі даних користувачеві, що знаходиться в будь-якому місці.

Клімат в Харкові, з точки зору розглянутої проблеми, характеризується тим, що з липня по серпень триває посушливий період, під час якого зволоження відбувається переважно грозами. Пік опадів припадає на грозовий червень і липень (по 61 мм). У липні опади зазвичай бувають кілька разів, але

ці грозові дощі мають зливовий характер і відрізняються величезною силою. Ця обставина може бути найбільш деструктивним чинником, що порушує працездатність проєктованих тропосферних і наземно-космічних ліній зв'язку [44,45].

Найважливішим параметром, що визначає надійність лінії зв'язку, є параметр готовності (неготовності) лінії зв'язку, який кількісно характеризує ймовірність порушення зв'язку. Розрахувати значення параметра готовності/неготовності лінії зв'язку можна, використовуючи рекомендації міжнародного союзу з телекомунікацій ІТУ. В основі прогнозування значень коефіцієнта готовності, крім конкретизації поставлених апаратурних параметрів лінії зв'язку (чутливість приймача, коефіцієнт посилення антени, тощо. В ММ ДХ вкрай важливі дані кумулятивної функції розподілу атмосферного ослаблення для кожного розглянутого регіону. Адже ослаблення, викликане дощем, є основною причиною перебоїв в роботі систем тропосферного та супутникового зв'язку, що використовують СМ і ММ діапазони хвиль (ДХ) [46...48].

Знання статистичних параметрів ослаблення сигналу на похилих трасах через опади та купчастих типів хмарності необхідне при визначенні надійності і продуктивності супутникових ліній зв'язку.

1.3 Характеристики опадів

Типи опадів:

– стратифіковані опади характеризуються наявністю великих зон з малою інтенсивністю дощу і невеликими вкрапленнями зливових ділянок зі швидкістю випадання до 25 мм/год. Цей тип опадів стратифікований в горизонтальному напрямку, причому висота шару дощу досягає смуги яскравості, висота шару снігу – близько 7 км, а шару кристалів льоду – близько 9 км;

– конвективні опади характеризуються локалізованими областями порівняно інтенсивних опадів. Ці області мають колоноподібну форму. Можуть

виникати дуже інтенсивні опади тривалістю до десятків хвилин і протяжністю в декілька кілометрів;

– мусонні опади характеризуються чергуванням смуг інтенсивних конвективних і стратифікованих опадів. Смути дуже сильного дощу зазвичай мають ширину до 50 км, а в довжину досягають на сотні кілометрів і можуть тривати кілька годин;

– тропічні шторми – це великі області опадів, що тягнуться на сотні кілометрів. Для шторму характерна наявність декількох спіралеподібних смуг, які закінчуються в зонах інтенсивних опадів, які оточують центральну частину. Ці смуги включають в себе зони інтенсивних конвективних опадів [49].

Наземні радіолінії складають важливу частину інфраструктури електрозв'язку в більшості країн світу. Правильне визначення основних характеристик, пов'язаних з впливом поширення радіохвиль, має вирішальне значення для ефективності роботи мережі і якості підтримуваних послуг, а також суттєвої економічної вигоди найбільш ефективного використання електромагнітного спектра [50].

1.3.1 Ослаблення в атмосферних газах

Деяке ослаблення за рахунок поглинання в кисні і водяних парах присутнє завжди, і має враховуватися при розрахунку загальних втрат при поширенні радіохвиль на частотах вище приблизно 10 ГГц [51, 52].

Процедура прогнозування ослаблення, була отримана з аналізу одночасного вимірювання інтенсивності дощу і поширення, отриманих головним чином в Європі, з деякими додатковими даними з Японії і Сполучених Штатів Америки. Вона використовує концепцію ефективної довжини траси, враховуючи параметри нерівномірності інтенсивності дощу вздовж траси. Метод заснований на обчисленні ослаблення, перевищує протягом 0,01 % часу, від інтенсивності дощу, перевищує протягом того ж відсотка часу. Для даного значення обчислюється питоме ослаблення, яке для

отримання відповідного значення множиться на ефективну довжину траси (1.7).

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d \cdot \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}}, \quad (1.7)$$

де γ_R – питоме ослаблення,

d – довжина траси,

d_0 – еквівалентна довжина дощової комірки.

Емпіричні рівняння використовуються для масштабування на інший відсоток часу (p), для забезпечення повного розподілу ослаблення. Ці рівняння виведені на основі експериментальних даних. Для ліній радіозв'язку, розташованих на широтах, рівних або більше 30°

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)}. \quad (1.8)$$

Для ліній радіозв'язку, розташованих на широтах менш 30°

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07p^{-(0,855 + 0,139 \log_{10} p)}. \quad (1.9)$$

Обидва рівняння були виведені для відсотка часу від 1 % до 0,001 % і їх використання повинно бути обмежено цими межами. Концепція рівнів ймовірності не узгоджується з метеорологічними даними, і вона не цілком задовільна з теоретичної точки зору.

Точність, одержувана в методі передбачення для наземних ліній зв'язку, узгоджується з якістю і мінливістю доступних даних про інтенсивність дощу [53].

Питоме ослаблення γ_R (дБ/км) на даній частоті може бути отримано з інтенсивності дощу, впливає з відомого комплексного показника заломлення води при температурі дощових крапель, кінцевої швидкості і області розподілу дощових крапель. Внаслідок несферичної форми крапель дощу горизонтально поляризовані хвилі схильні до ослаблення більшою мірою, ніж вертикально поляризовані хвилі. У деяких кліматичних областях різниця в ослабленні може досягати значень до 35 %. Питоме ослаблення для вертикальної і горизонтальної поляризації, для частот до 100 ГГц, може бути отримано з розширених розрахунків, які враховують несферичну форму крапель дощу.

Для практичного застосування ставлення між удільним ослабленням γ_R

(дБ/км) і інтенсивністю дощу R (мм/год), можна апроксимувати статичним законом

$$\gamma_R = kR^a \quad . \quad (1.10)$$

Беручи припущення сферичних крапель, значення k і a були розраховані для ряду частот в діапазоні від 1 до 1000 ГГц для декількох температур крапель і розподілів розмірів крапель [54].

Ефективною довжиною траси в наземних лініях зв'язку є довжина гіпотетичної траси, отриманої з даних поширення радіохвиль шляхом ділення загального ослаблення, перевищує в 0,01 % часу, на питоме ослаблення, яке перевищується протягом того ж відсотка часу.

Коефіцієнт ослаблення траси визначається як

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (1.11)$$

Дане рівняння отримано на основі двох припущень:

– просторову структуру дощу можна змоделювати еквівалентними дощовими осередками з прямокутним поперечним перерізом еквівалентної довжини d_0 в площині траси;

– дощові осередки з прямокутним поперечним перерізом можуть займати будь-яке положення щодо траси з однаковою ймовірністю.

Ефективна довжина траси відповідає середній протяжності перетину наземної траси і довжини випадково розташованої еквівалентного дощового осередку d_0 , перевищує в 0,01 % часу.

Довжина d_0 еквівалентного дощового осередку спочатку передбачалася постійною, але потім модель була поліпшена залежністю від інтенсивності дощу

$$d_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}} \quad (1.12)$$

Для $R_{0,01} > 100$ мм/год замість $R_{0,01}$ використовується величина 100 мм/год.

Хоча це рівняння засноване на даних похилих трас з ослабленням в дощі, воно було успішно перевірено результатами вимірювань ослаблення в дощі на

наземних лініях зв'язку.

1.3.2 Прогнозування поєднання дощу і мокрого снігу

Цей метод використовує глобальну карту висоти дощу і непрямую інформацію для оцінки кількості мокрого снігу, а також середнього ослаблення профілю для отримання перевищення ослаблення на рівні танення. Крім того, він враховує певні розподіли висоти опадів або ізотерми нульового градуса, а також те, що перевищення ослаблення фіксованою форми рівня танення є функцією від положення цього рівня. За допомогою таких даних можна прогнозувати ослаблення розподілу на будь-якій лінії зв'язку, беручи до уваги, як дощ, так і мокрий сніг.

Рівень танення складається з суміші льоду, води і повітря [55]. Падаючі крижані гідрометеори тануть, зливаються, а потім розділяються на окремі краплі дощу. Випадання опадів у вигляді мокрого снігу може статися на трасі поширення радіохвиль, коли температура повітря становить близько 0 °С. Теорія ослаблення в дощі добре зрозуміла і змодельована для використовуваних діапазонів частот.

Теоретичні коефіцієнти ослаблення встановлені для різних розмірів і форм частинок, а конкретні спрощені моделі встановили залежність ослаблення від частоти і поляризації, а також кута траси по відношенню до головної осі великих несферичних крапель дощу. Навпаки, частки мокрого снігу викликають значно серйозніші труднощі при моделюванні, але певні спроби зроблені. Теоретичний аналіз поширення радіохвиль через рівень танення використовує моделі таючих частинок льоду. Знайдено, що частинки мокрого снігу мають більший коефіцієнт ослаблення, ніж краплі дощу при однаковій кількості води, що викликає перевищення питомого ослаблення в порівнянні з дощем. У радіолокації використовується термін "яскрава смуга" через спостережуваного сильного радіолокаційного фону відлуння від цього рівня. На додаток до ослаблення основної поляризації, анізотропний характер частинок

мокрого снігу також може привести до деякої деполяризації. На рисунку 1.7 показано: – множник для оцінки додаткового ослаблення на рівні танення порівняно з дощем, на рисунку 1.8 приведена – висота над середнім рівнем моря.

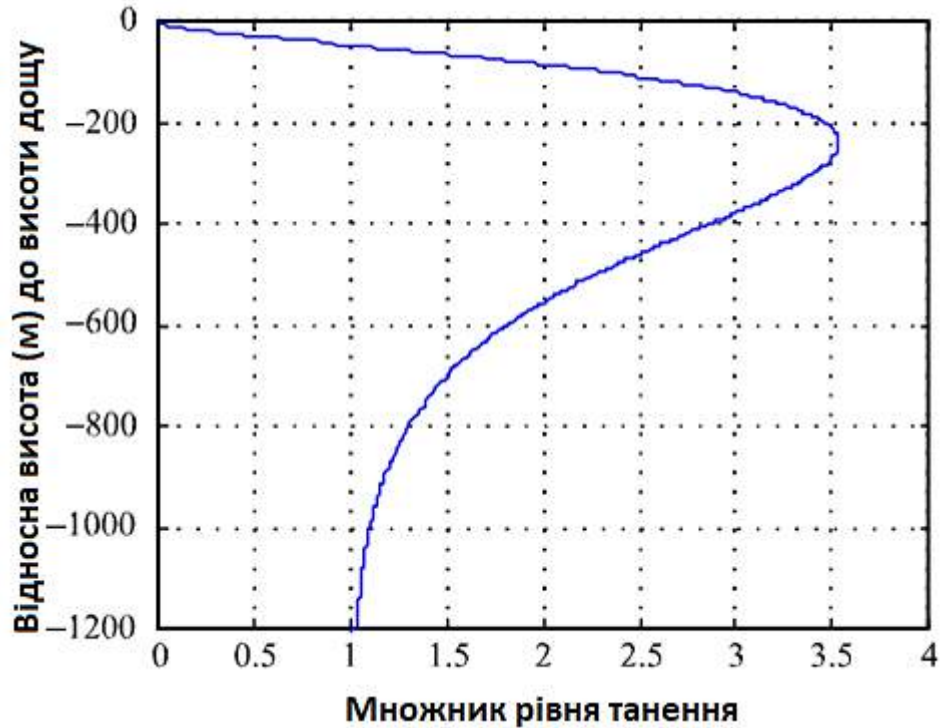


Рисунок 1.7 – Множник для оцінки додаткового ослаблення на рівні танення в порівнянні з дощем

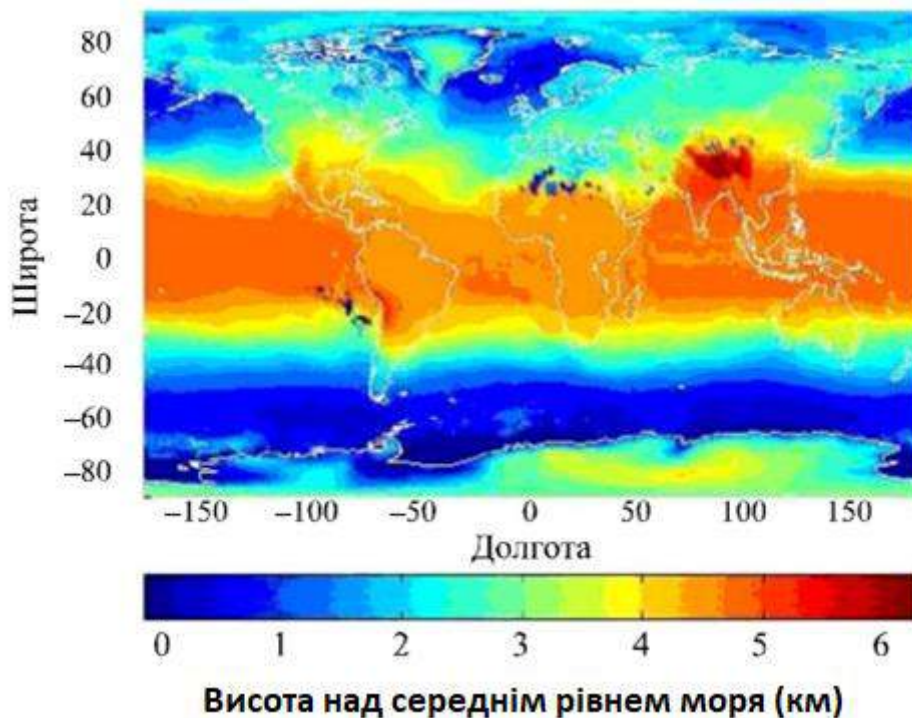


Рисунок 1.8 – Висота над середнім рівнем моря

Метод прогнозування для комбінованого дощу і мокрого снігу, представлений в даній дисертації, використовує спрощену апроксимацію. Множник дорівнює 1 для дощу, і більше 1 для мокрого снігу, його максимум трохи перевищує 3,5 він дорівнює 0 для сухого льоду або снігу.

Множник описується $\Gamma(h)$:

$$\Gamma(h) = \begin{cases} 0 & 0 < h \\ \frac{a(1-e^{h/b})^2}{(1+(1-e^{-(h/c)^2})^2(a1-e^{-(h/b)^2})^2-1)} & h \leq 0, \end{cases} \quad (1.13)$$

У грубому наближенні значення цих трьох коефіцієнтів впливають на максимальне значення множника, його положення щодо верхньої частини і глибини рівня, відповідно. Ця функція асимптотично наближується до 1 для великих негативних значень h , зокрема вона дорівнює 1 для $h < -1\ 400$ при зазначених a , b , і c .

На практиці множник, використовуваний для прогнозування, є інтегралом коефіцієнтів множення, зважених з функцією щільності ймовірності відносної висоти рівня танення вздовж траси. Множник встановлений по відношенню до висоти ізотерми при нулі градусів.

Метод передбачення для комбінації дощу, мокрого снігу та сухого снігу простий і використовує такі припущення:

- рівень опадів відомий з карт в Рекомендації МСЕ-R P.837;
- опади підрозділяються на дощ, мокрий сніг та сухий сніг або лід використовуючи висоту, як показано на карті в Рекомендації МСЕ-R P.839, і модель рівня танення;
- розподіл ослаблення при поєднанні дощу і снігу такий же, як розподіл для одного дощу.

Ключовий момент методу полягає у визначенні множника з урахуванням вкладу мокрого і сухого снігу. Якщо спостерігаються всі опади, цей множник дорівнюватиме 1, і не буде ніяких змін порівняно з результатами застосування використовуваної сьогодні процедури (див. Рекомендацію МСЕ-R P.530).

Однак, якщо всі спостережувані опади присутні у вигляді сухого снігу або льоду, то множник дорівнює 0, і ослаблення оцінити неможливо. Цілком очевидно, що це відрізняється від існуючого методу. В реальних випадках, оскільки протягом року висота нуля градусів коливається, велика частина опадів буде випадати у вигляді дощу, з невеликою кількістю мокрого і сухого снігу. Ослаблення в мокрому снігу може бути значно більше, ніж в дощі. Таким чином, з огляду на всі можливості, ймовірно коефіцієнт буде більше 1, так що повинен бути дозволений деякий додатковий запас для мокрого снігу.

У процедурі повинні бути встановлені і використані дві функції: середня висота дощу, отримана з висоти ізотерми для нуля градусів, і її зміна або розподіл, дані по висоті дощу наводяться в Рекомендації МСЕ-R P.839.

1.3.3 Масштабування

Масштабування для однієї частоти. Якщо доступні тільки дані про ослаблення, виміряні на одній частоті, то може застосовуватися емпірична формула з Рекомендації МСЕ-R P.530, в якій коефіцієнт ослаблення наводиться як функція частоти і ослаблення, для частотного масштабування на тій же трасі в діапазоні частот від 7 до 50 ГГц (і умовно до 100 ГГц)

$$A_2 = A_1(\Phi_2/\Phi_1)^{1-H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)}$$

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1+10^{-4} f^2}$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3}(\Phi_2/\Phi_1)^{0,5} (\Phi_1, A_1)^{0,55}, \quad (1.14)$$

де A_1 і A_2 - рівноімовірні значення перевищення ослаблення в дощі на частотах f_1 та f_2 (ГГц) відповідно.

Поляризаційне масштабування. Якщо доступні тільки дані про ослаблення, виміряні для однієї поляризації (вертикальної або горизонтальної), то для поляризаційного масштабування рівно можливих значень ослаблення в дощі в межах діапазону довжини траси і частоти методу передбачення ослаблення можуть застосовуватися рівняння 1.15 з Рекомендації МСЕ-R P.530.

Поляризаційне масштабування має застосовуватися тільки до результатів вимірювань або обчислень ослаблення через дощ. Слід додати додаткове ослаблення через поглинання в газах. Вирази, наведені в Рекомендації МСЕ-R P.530, є загальним узгодженням з результатами експериментів і з припущеннями, що використовують певні коефіцієнти ослаблення з Рекомендації МСЕ-R P.838

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{дБ}$$

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{дБ.}$$
(1.15)

Ці вирази вважаються справедливими для методів передбачення ослаблення в дощі в деякому діапазоні значень довжини траси і частоти. Однак слід зауважити, що результати обчислення коефіцієнтів поляризаційного масштабування, що використовують радіолокаційні дані, припускають, що вони будуть використані для звичайного дощу. Це може викликати деяку кліматичну залежність.

1.4 Поширення радіохвиль ММ діапазону в місті

При побудові радіоканалу ММ ДХ у межах міста потрібно враховувати що антени повинні бути чітко спрямовані одна на іншу [56].

Щоб радіоканал стабільно працював необхідно постійно поновлювати статистику про інтенсивність опадів. Із за постійних змін клімату дані які були отримані більше десяти років тому вже не актуальні.

Максимальна довжина траси у кожному дощовому регіоні залежить від характеристик апаратури яку використовують при розробці. Це означає, що при плануванні мережі потрібно вибрати правильне технічне обладнання.

Як було сказано у підрозділах вище, на розсіювання радіохвиль ММ діапазону впливає дуже багато різноманітних факторів, можна сказати на нього впливає майже все що знаходиться у навколишньому середовищі. При

вирішенні всіх цих факторів потрібно застосовувати свій підхід. Із за всіх цих факторів, особливо у місті, так як заводи ще вносять будинки, антени ММ ДХ будуть встановлюватися на досить маленькій відстані одна від іншої.

Також у різні пори року буде різний вплив навколишнього середовища на ММ ДХ. Тому потрібно цілорічні дані опадів для кожного регіону. Лінії, які побудовані у північній півкулі землі, рівень сигналу в літні місяці декілька вище ніж у зимові. Зміни рівня сигналу у середніх широтах досягають значень навіть 10...12 дБ.

У тропосфері розсіювання радіохвиль ММ діапазону залежить від чотирьох факторів, це: поглинання у гідрометеорах, молекулярне поглинання, розсіювання на молекулах і агрегатах молекул, а також в умовах димки і поглинання у тропосфері твердими частинками пилу та диму.

При розрахунку готовності каналу зв'язку ММ діапазону на димку і туман можна не звертати увагу так як довжина хвилі приблизно 4 мм, розміри частинок димки і туману значно менше 4 мм. Їх частинки можуть погіршити поширення радіохвиль лише в одному випадку, це погіршити характеристики антени осівши на її поверхню і змінити її властивості. Але це вже інша задача і тут потрібно думати як захистити від цих факторів вже саме обладнання.

Стабільної роботи радіоканалу ММ ДХ можливо досягти лише на трасах з прямою видимістю «point to point».

1.5 Оцінка енергетичних характеристик каналу зв'язку

Оцінку енергетичного потенціалу потрібно проводити для різних комбінацій наступних груп системних параметрів з урахуванням впливу рівня бічних пелюсток антен:

- параметри приймальної та передавальної антен;
- потужність яку випромінює передатчик та чутливість приймача;
- тип модуляції;
- втрати при поширенні.

В наш час при плануванні та побудові каналу зв'язку ММ ДХ застосовують двозеркальні параболічні антени. Ці антени використовують із за того що у цих антен менше затінювання поверхні дзеркала ніж у інших, і тому у двозеркальних параболічних антен більший коефіцієнт поверхні яку можна використовувати.

У таблиці 1.1 наведено спрямованості антени за рівнем половинної потужності.

Таблиця 1.1 – Спрямованості антени за рівнем половинної потужності

Середні частоти піддіапазонів	$f_1 = 93,5$ ГГц	$f_2 = 83,5$ ГГц	$f_3 = 73,5$ ГГц
Діаметр дзеркала			
$d_1 = 0,3$ м	46,7 дБ/0,75°	45,7 дБ/0,84°	44,6 дБ/0,95°
$d_2 = 0,45$ м	50,2 дБ/0, 5°	49,2 дБ/0,56°	48,1 дБ/0,63°
$d_3 = 0,6$ м	52,7 дБ/0,37°	51,7 дБ/0,42°	50,6 дБ/0,48°

На рисунку 1.9 розрахована та показана діаграма спрямованості антени в діапазоні напрямків випромінювання $\pm 30^\circ$ з урахуванням потужності випромінювання передавача і основних втрат при поширенні у вільному просторі на відстані 500 м від передавача; на діаграмі також показаний рівень потужності сигналу в перерахунку на ізотропну антену. Як видно з графіка, випромінювання в діапазоні кутів $\pm 10^\circ$ менше рівня ізотропного випромінювання.

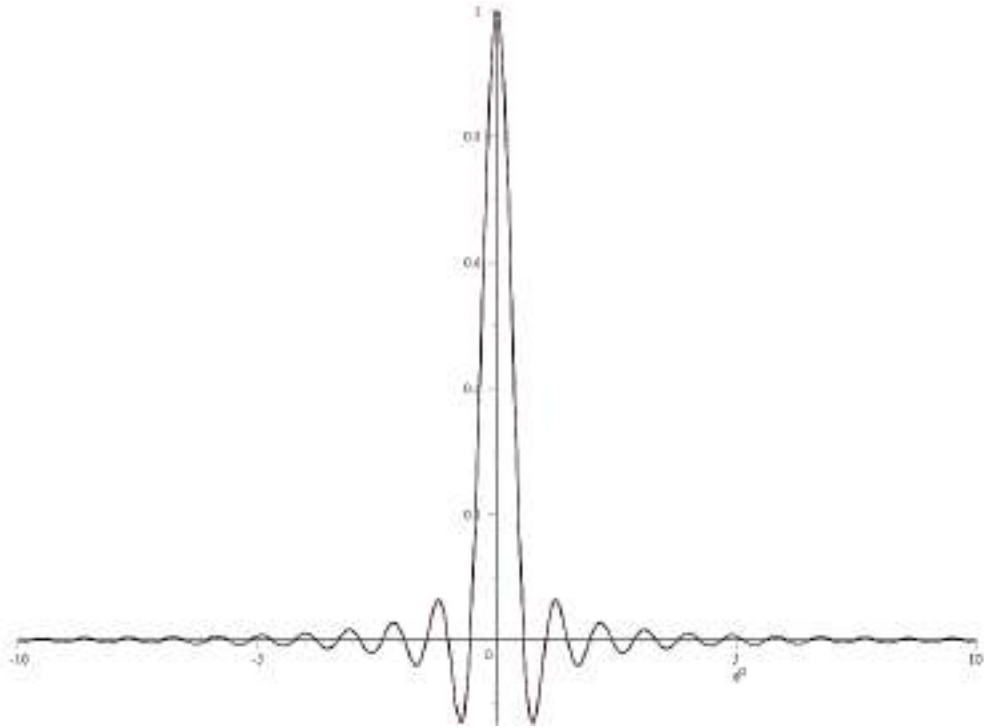


Рисунок 1.9 – Нормована діаграма спрямованості параболічної антени

На рисунку 1.10 видно зміни потужності на виході приймача залежно від втрат при поширенні та відстані. Тут ізотропна випромінювана потужність передавальної антени дорівнює 40,9 дБ.

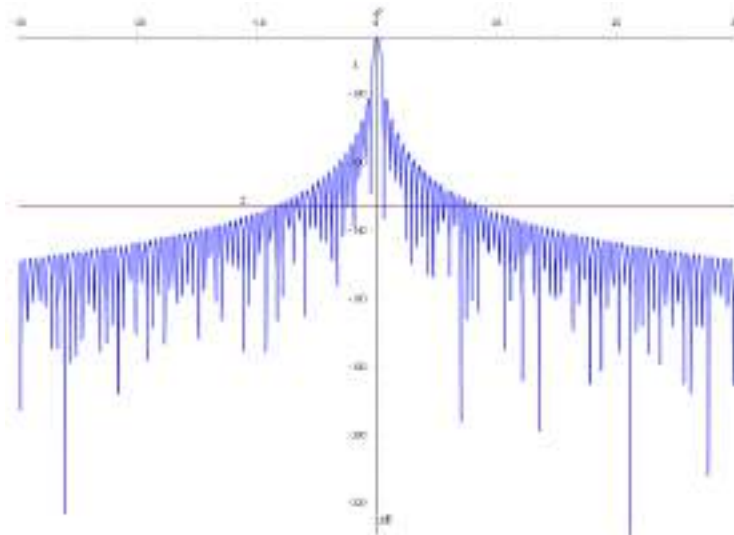


Рисунок 1.10 – Діаграми спрямованості застосовуваної антени і ізотропної антени

За даними рисунку 1.11 можна дати оцінку дальності зв'язку при типах модуляції що зазначені.

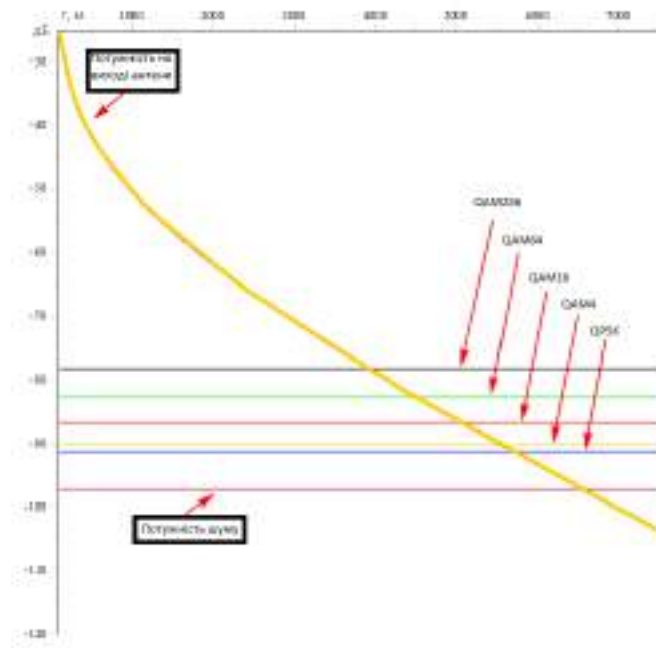


Рисунок 1.11 – Залежність потужності на виході приймальної антени від відстані і повних втрат (ЕІВП передавача 40,9 дБ) і необхідні рівні потужністю для різних типів модуляції сигналу

Так, наприклад, для дальності зв'язку 500 м і типі модуляції QAM256 необхідна ЕІВП передавача буде дорівнювати ЕІВП - 36,5 = 4,4 дБ (2,75 Вт), і тоді потужність передавача відповідна 4,4 дБ буде дорівнювати -44,8 дБ/Вт ($3,3 \cdot 10^{-5}$ Вт).

Енергія яка випромінюється бічними пелюстками антен передавальних пристроїв інколи в деяких різних випадках створює завади. Рівень цих завад залежить від діаграми спрямованості антени, потужності радіопередавача і частоти. У різних форм антен з різними формами, від розподілу її поля у розкриві і від середньоквадратичної похибки антени залежить діаграма спрямованості антени та рівень бічних пелюсток.

На рисунку 1.12 показана залежність діаграми спрямованості антени залежно від відстаней від 0 до 500 м, при роботі радіопередавача що використовує модуляцію QAM256. Ще на рисунку показано рівень потужності для ізотропної антени. При побудові даних які представлені на даному рисунку не були враховані втрати у дощі і гідрометеорах, так як при відстанях менших

за 500 метрів ці втрати не дуже великі. Наприклад, при відстані 70 м (перший пелюсток ДСА) втрати будуть 0,38 дБ.

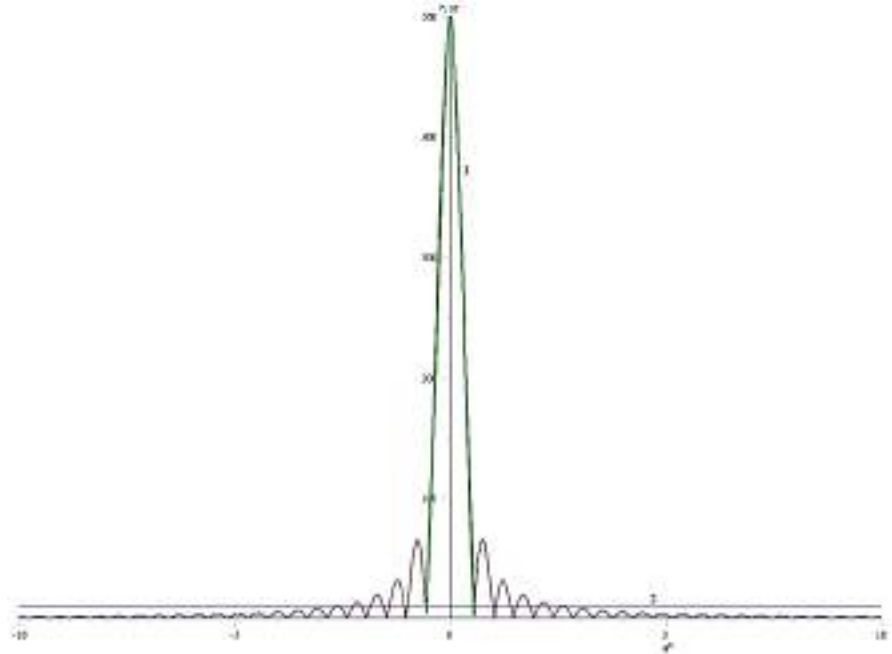


Рисунок 1.12 – Залежність відстаней від кута ДСА при $P_{\text{прд}} = 3,3 \cdot 10^{-5}$ Вт, чутливості приймачів $P_{\text{мін}} = 1,6 \cdot 10^{-9}$ Вт, тип модуляції QAM256 для спрямованої антени (1) і відстань для ізотропної антени і порогової чутливості приймача

Зазначені вище підходи та методи розрахунку дальності з урахуванням таких апаратурних параметрів, як ширина та рівень бічного випромінювання діаграми спрямованості антен, робоча частота та методи модуляції лежать в основі оцінок енергетичного потенціалу різних комбінацій цілого ряду груп системних параметрів проєктованих ліній зв'язку.

1.6. Модель яка використовується при моделюванні поширення радіохвиль

Характеристики ослаблення та радіотеплового випромінювання земної атмосферою радіохвиль ММ ДХ в даний час широко використовуються в телекомунікаційній (ТЛК) практиці та задачах дистанційного зондування навколишнього середовища (ДЗ НС) для оцінок надійності ліній зв'язку та для відновлення фізичних параметрів земної поверхні та атмосфери. При цьому

атмосферне ослаблення та формування власного випромінювання в газових та гідрометеорних складових атмосфері обумовлено різними механізмами, отже, описується суттєво різними моделями, що викликає інтерес до експериментального та теоретичного вивчення кожного з цих середовищ.

Повне погонне тропосферне поглинання та випромінювання атмосфері в ММ ДХ за відсутності гідрометеорів практично повністю визначається двокомпонентним молекулярним поглинанням у водних парах і в кисні [57...60]. У зв'язку з тим, що поглинання в цих компонентах має резонансний характер, радіояркісну температуру атмосфері в ММ ДХ залежить не тільки від розподілу термодинамічної температури — T_0 , тиску — P_0 , і вологості - m_b з висотою, але і від довжини хвилі. Ці функціональні залежності можуть бути отримані за квантово-механічними формулами.

Теоретичні розрахунки поглинання водяною парою та киснем розвивалися одночасно з експериментальними дослідженнями [61-65]. В даний час у певних припущеннях розроблено квантово-механічну теорію розрахунку поглинання атмосфері водяною парою, яка враховує велику кількість обертальних переходів молекул, роблячи такі розрахунки дуже громіздкими [57]. Перші порівняння теоретичних коефіцієнтів поглинання H_2O з експериментальними значеннями показали перевищення останніх у вікнах прозорості в 3-4 рази, а на деяких довжинах хвиль - ще більше [57]. Було зроблено безліч спроб усунути зазначену невідповідність уточненням розрахунків, але й досі немає повного збігу теоретичних даних з експериментальними.

Для подолання цих невідповідностей було розроблено напівемпіричні та інженерні методи розрахунку коефіцієнтів молекулярного поглинання. Останні 50 років для розрахунків погонного поглинання у вікнах прозорості ясної атмосфері, як правило, використовуються саме напівемпіричні моделі. Вони підвищили точності опису молекулярного поглинання що досягається широким залученням експериментального матеріалу, на основі якого робляться виправлення до теоретичних результатів.

Опис радіотеплового випромінювання (поглинання та ослаблення) хвиль ММ діапазону у хмарному покриві та дощах може бути проведено за допомогою формул теорії дифракції на сферичних частинках (теорії Мі), використовуючи при цьому для врахування впливу температурно залежних діелектричних властивостей водяних крапель різні модифікації теорії Дебая чи формул Рея [66,67]. Однак через складність і громіздкість підходу, заснованого на теорії Мі, найбільше поширення останні десятиліття отримали наближені методи з використанням напівемпіричних співвідношень.

У дисертаційній роботі використовувався метод Ліїба, який забезпечує прийнятну точність розрахунків. Від одиниць відсотків 1 – 100 ГГц, до 30 % на частотах 1000 ГГц.

Розрахунок повного вертикального поглинання в атмосфері або на похилих трасах зазвичай проводиться шляхом інтегрування на основі комбінації однієї з перерахованих вище радіофізичних моделей, що описують горизонтальне поглинання і моделей, що описують висотний розподіл метеопараметрів. Серед останніх найбільшого практичного поширення протягом багатьох десятиліть набули модель US-60 та її модифікації [57], ITU-R стандарт P-835-3 [68], або використання локальних баз даних для усереднення багаторічних метеозондових спостережень.

У 2004 році ITU рекомендував використання кардинально нового глобального стандарту атмосфери, побудованого на основі модельної бази даних ERA-15 для висотного, розподілу метеоданих [69]. До переваг цього стандарту в порівнянні з аналогами, варто віднести можливість визначення метеопараметрів для будь-якого регіону світу, а також п'ятнадцятирічний період накопичення метеоданих, на підставі яких він був розроблений. Проте розгляд питань достовірності та застосування цього сучасного метеорологічного стандарту атмосфери для радіофізичних додатків у літературі практично відсутній та вимагає проведення додаткових досліджень.

У літературі наводяться дані зіставлення методу Ліїба з експериментальними даними.

В таблицях 1.2 та 1.3 приведено порівняння цих даних.

Таблиця 1.2 - Експериментальні дані

Місяць	Погонне поглинання, дБ/км		Повне вертикальне поглинання, дБ	
	H_2O	O_2	H_2O	O_2
Завада	H_2O	O_2	H_2O	O_2
Січень	0,06	0,075	0,14	0,36
Липень	0,4	0,044	0,76	0,27

Таблиця 1.3 - Теоретичні дані

Місяць	Погонне поглинання, дБ/км		Повне вертикальне поглинання, дБ	
	H_2O	O_2	H_2O	O_2
Завада	H_2O	O_2	H_2O	O_2
Січень	0,07	0,069	0,16	0,41
Липень	0,36	0,049	0,82	0,28

З порівняння таблиці 1.2 та таблиці 1.3 видно, що невідповідність експериментальних та теоретичних даних для виражених у дБ значень коефіцієнтів погонного поглинання становить менше 7%. Розбіжність теорії та експерименту для виражених у дБ значень повного вертикального поглинання становило близько 10% [60, 70].

Розрахунки середньомісячних значень ослаблення для міста Харків проводилися за допомогою радіофізичної МРМ моделі Ліїба в сукупності з моделлю МСЕ.

Рекомендація МСЕ-R Р.837-6 дає можливість розрахунку готовності каналів зв'язку ММ ДХ [71].

Асамблея радіозв'язку МСЕ, враховуючи те що:

- для прогнозування ослаблення в дощі та розсіювання, що викликаються опадами, необхідна інформація про статистичні дані щодо інтенсивності опадів;
- що така інформація необхідна для всіх точок земної кулі та для широкого діапазону ймовірностей;
- що статистичні дані щодо інтенсивності дощових опадів з часом інтегрування 1 хв. потрібні для прогнозування послаблення в дощі та розсіювання в наземних та супутникових каналах зв'язку;

– що дані довгострокових вимірювань інтенсивності дощових опадів можуть бути отримані з місцевих джерел з часом інтегрування 1 хв., а також з часом інтегрування понад 1 хв.;

– що спостерігалось використання моделі перетворення даних місцевих вимірів з часом інтегрування до 1 години для забезпечення більш високої точності, ніж при використанні глобальних цифрових карт.

рекомендує:

– що модель, наведену в додатках рекомендації, слід використовувати для отримання інтенсивності дощових опадів R_p , що перевищується на будь-який заданий відсоток від рівня середнього року p і будь-якого розташування (при часі інтегрування 1 хв.). Ця модель повинна застосовуватися до даних, що подаються у цифрових файлах ESARAIN_xxx_v5.TXT; (файли даних можуть бути отримані на веб-сайті MCE-R у тій частині, яка відноситься до 3-ї Дослідницької комісії з радіозв'язку);

– що для зручності посилань слід використовувати дані, наведені у додатку 2 рекомендації, для вибору інтенсивності дощових опадів, що перевищується на 0,01 % рівня середнього року. Ці дані також були складені на основі моделі та даних, що описуються у додатку 1 наведеному у рекомендації;

– що слід використовувати, за їх наявності, місцеві довготривалі вимірювання інтенсивності дощових опадів.

У Рекомендації MCE-R P.837 містяться карти метеорологічних параметрів, що були отримані з використанням бази даних повторних розрахунків ERA-40 Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), рекомендовані для прогнозування статистичних даних інтенсивності дощових опадів з часом інтегрування 1 хвилина у разі відсутності даних місцевих вимірів. Головним тезисом є те що цю рекомендацію можна використовувати якщо немає даних місцевих вимірів. Дані з рекомендації ITU слід використовувати, якщо немає в наявності, місцевих вимірів інтенсивності дощових опадів із часом інтегрування 1 хв.

Один із розділів дисертації присвячений збору статистики інтенсивності

дощових опадів з часом інтегрування 1 хвилини. Маючи дані місцевих вимірів можна більш точно розрахувати коефіцієнт готовності та продуктивності калів зв'язку ММ ДХ. Завдяки цьому можна побудувати більш прогнозовану роботу каналів, мати економічну вигоду, так як відстань між прийомо-передавачів та їх потужність можна розрахувати більш точно. Отримавши ці дані можна провести розрахунки для кліматичної зони Е, в якій знаходиться місто Харків, завдяки яким можна побудувати стабільно працюючі радіоканали на частоті 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц.

Етап 1: Витягти змінні P_{r6} , M_t і β для чотирьох пунктів, найбільш близько розташованих за широтою та довготою до географічних координат заданого положення.

Етап 2: Зі значень P_{r6} , M_t і β в чотирьох точках координатної сітки отримати значення P_{r6} (широта , довгота), M_T (широта , довгота) та β (широта , довгота) у заданому місці, здійснюючи дволінійну інтерполяцію.

Етап 3: Конвертувати M_T і β на M_c і M_s наступним чином

$$M_c = \beta M_T, \quad (1.16)$$

$$M_s = (1 - \beta) M_T. \quad (1.17)$$

Етап 4: Вивести процентну ймовірність дощових опадів у середньому році P_0 на основі рівняння

$$P_0(Lat, Lon) = P_{r6}(Lat, Lon) \left(1 - e^{-0,0079 \left(\frac{M_s(Lat, Lon)}{P_{r6}(Lat, Lon)} \right)} \right). \quad (1.18)$$

Якщо P_{r6} дорівнює нулю, то відсоткова ймовірність дощових опадів у середньому році та показник інтенсивності дощових опадів, що перевищується на будь-який відсоток від рівня середнього року, дорівнюють нулю. В цьому випадку необхідні такі етапи.

Етап 5: Вивести показник інтенсивності дощових опадів R_p , що перевищує p % від рівня середнього року, де $p \leq P_0$ на основі рівняння

$$R_p(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \text{ММ} \cdot \text{год} \quad (1.19)$$

де:

$$A = ab$$

$$B = a + c \ln(p/P_0(Lat, Lon))$$

$$C = \ln(p/P_0(Lat, Lon))$$

$$a = 1,09$$

$$b = \frac{M_c(Lat, Lan) + M_s(Lat, Lan)}{21797P_0}$$

$$c = 26,02b$$

Для проведення оцінок поглинання міліметрових хвиль у дощі у частотному діапазоні від 1 до 1000 ГГц у MPM моделі Ліїба використовується вираз

$$a = 0,1820N_R''(f) \text{ дБ/км.} \quad (1.20)$$

Величина коефіцієнта заломлення в дощі, N_R визначається ефектами поглинання і розсіювання. Найбільш суттєво ефекти розсіювання проявляються у випадках, коли діаметри крапель (від 0,1 до 5 мм) та робоча довжина радіохвилі стають однаковими. В обхід складних і трудомістких обчислень, використовують теорію Мі, яка потребує знання форми та розподілу крапель за розмірами, а також діелектричної проникності води, у MPM моделі використовуються такі апроксимації

$$N_R''(f) \approx c_R R^Z, \quad (1.21)$$

та

$$N_R'(f) \approx R(0,012R - 3,7)y^{2,5} / [f_R(+y^{2,5})], \quad (1.22)$$

де

$$y = \frac{f}{f_R} \text{ та } f = 53 - R(0,37 - 0,0015R) \text{ ГГц} \quad (1.23)$$

Ключовим параметром цієї моделі є інтенсивність дощу R (0...200 мм/год).

При проведенні оцінок вертикального згасання в атмосфері в багатьох випадках необхідно враховувати згасання крапельної фракції зважених частинок хмар. Наприклад, для України наявність різних типів хмарного покриву протягом року становить близько 80 % часу. При цьому величина загасання в цьому середовищі в першу чергу залежить від концентрації

крапель, їхньої температури та товщини хмарного шару.

Атмосферна рефракція радіохвиль розраховується за такою формулою [72]

$$N_t(f) = N_0 + N(f) = N_0 + N'(f) - jN''(f), \quad (1.24)$$

де N_0 – дійсна і позитивна не дисперсійна частина,

N – комплексна функція частоти.

Головною перевагою цих моделей є те що використовуючи їх можна розрахувати та побудувати радіоканали ММ ДХ, але це є і головним недоліком. Без експериментальних даних жодна модель не дає точних значень для побудови радіоліній ММ ДХ. Дані які надає Рекомендація МСЕ-R P.837-6 не настільки точні як потрібно для більш достовірного розрахунку. Теоретичні розрахунки дають велику похибку, яка не допустима та робить недоцільним масове впровадження в Україні каналів зв'язку п'ятого покоління. Використовуючі дані отримані не з експериментальних досліджень доцільно будувати тільки невеликі прольоти. При побудові ймовірних моделей радіоканалів краще враховувати дані інтенсивності дощових опадів отриманих на місці побудови (в Україні), які вкрай важливі для точних розрахунків та з економічної точки зору. Таких даних в Україні немає. Одним з головних завдань роботи було набір статистики інтенсивності дощових опадів з коротким часом інтегрування, експериментальні дослідження зондування атмосфери використовуючи радіометр 8 мм, для подальшого отримання кумулятивного розподілу питомого загасання атмосфери.

Метою дисертаційної роботи є визначення характерних для кліматичної зони Е статистичних параметрів готовності (availability performance) та надійності 5G каналів перспективного у всьому світі зв'язку у міліметровому діапазоні хвиль (ММ ДХ) з урахуванням факторів сезонно-погодної мінливості.

1.7 Постановка задач дослідження

В статті «Аналіз продуктивності систем мобільного зв'язку з нано- і пікосотами» за авторством Уривського Л. О. та Шмігеля Б. О. оцінка

продуктивності систем зв'язку розраховувалася наступним чином. Для оцінки ефективності систем з використанням нано- і пікосот будувалася енергетична модель загасання сигналів в радіолінії сигналів Wi-Fi і LTE.

Розрахунок бюджету лінії дозволяє оцінити максимально припустиме загасання сигналу між мобільним терміналом і антеною базової станції.

Складемо енергетичне рівняння для радіолінії системи LTE відповідно до моделі Хата. Потужність сигналу, що приймається абонентом, розраховується наступним чином:

$$P_{hata}(d) = P_{BS} + G_{BS} - L_{hata}(d) + G_{MS}$$

де P_{BS} – потужність сигналу базової станції;

G_{BS} , G_{MS} – підсилення антен базової та абонентської станції;

L_{hata} – занасання сигналу для радіолінії, відповідно до моделі Хата.

Швидкість передачі інформації можна знайти за формулою

$$R_i = \frac{\log_2 m \cdot R}{T} \left(\frac{\text{біт}}{\text{с}} \right)$$

де m – основа коду;

T – тривалість каналної послілки (тактовий інтервал передачі)

З точки зору оцінки продуктивності каналів зв'язку ММ діапазону цей метод не підходить, так як розрахований на для більш старих технологій та не враховує особливостей мікроклімату. У другому розділі дисертаційної роботи ми розробили вдосконалену математичну модель оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку.

На базі проведеного огляду в роботі основну увагу в якості критеріїв якості обслуговування (QoS) обрані такі основні параметри, які характеризують надійність каналів зв'язку: доступність та продуктивність системи, що характеризується заданою швидкістю передачі інформації для реалізації сучасних сервісів в зоні обслуговування.

Проведений аналіз впливу мікрокліматичних факторів атмосфери на характеристики поширення радіохвиль міліметрового діапазону частот, показав що вони суттєво впливають на якість обслуговування (QoS) в безпроводових

системах нового покоління 5G. Потрібно проведення додаткових наукових досліджень, які уточнюють деякі особливості впливу характеристик клімату атмосфері на параметри доступності та продуктивності сучасних систем зв'язку, що вказує на актуальність представленої роботи.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення моделей оцінки продуктивності систем зв'язку та методів радіометричних досліджень характеристик атмосфери, що дозволять отримати інформацію про загасання сигналів міліметрового діапазону для підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону радіохвиль шляхом обґрунтованого врахування впливу на радіоканал мікрокліматичних факторів атмосфери.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні наукові задачі:

- провести аналіз особливостей поширення радіохвиль міліметрового діапазону частот з урахуванням характеристик атмосфери для різних кліматичних зон, які визначені рекомендаціями Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU);

- розвинути методи отримання результатів кумулятивного розподілу питомого загасання атмосфери для ММ ДХ;

- розробити та створити програмно-апаратний вимірювальний радіометричний комплекс 40 ГГц;

- розробити методику проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом з використанням оригінального програмно-апаратного радіометричного комплексу для частоти 40 ГГц (8мм)

- розробити методи, моделі та засоби оцінки продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону радіохвиль, які враховують вплив мікрокліматичних факторів;

- отримати за допомогою методів та засобів радіометричних вимірювань нові статистичні експериментальні дані про загасання сигналів міліметрового діапазону радіохвиль при впливі мікрокліматичних факторів атмосфери для Харківського регіону України;

– провести експериментальні дослідження продуктивності та готовності ліній зв'язку міліметрового діапазону радіохвиль при моделюванні радіоканалів із з'єднанням прямої видимості (*line-of-sight – LOS*) або поза прямою видимістю (*non-line-of-sight – NLOS*) між обладнанням користувача (*UE*) та базовою станцією (*BS*) для сценаріїв розгортання телекомунікаційної мережі у відкритому просторі (*Outdoor*) та в приміщенні будівель (*Indoor*);

– виробити рекомендації для планування зон обслуговування систем зв'язку міліметрового діапазону частот при розгортанні обладнання в різних сегментах мережі доступу для забезпечення необхідного рівня доступності сервісів передачі інформації.

Висновки по розділу 1

1. Проведений у даному розділі розгляд стану питання та аналіз літературних джерел вказує як на перспективність та необхідність введення міліметрового діапазону хвиль у наступні покоління зв'язку, так і на перешкоди, які потрібно усунути для його оптимізованого використання. Внаслідок відсутності даних про розподіл інтенсивності кількості опадів неможливо провести адекватні розрахункові оцінки прогнозованих екстримальних значень погонного атмосферного ослаблення та як наслідок оптимізовано побудувати стабільно працюючий канал зв'язку.-

2. Проведений огляд впливу клімату на поширення та загасання радіохвиль міліметрового діапазону, а також наведені рівні загасання сигналу в опадах та карті кліматичних зон світу вказують на необхідність урахування регіональних мікрокліматичних особливостей при формуванні апаратурних параметрів та структури мереж зв'язку.

3. Розглянуті та наведені характеристики опадів та їх вплив. Та як вони впливають на ослаблення сигналу у міліметровому діапазоні хвиль вказують на можливість використання альтернативного експериментального, - розрахункового підходу для побудови кумулятивних функцій розподілу

значень погонного ослаблення на горизонтальних тропосферних трасах. Цей підхід може бути реалізований на основі використання сукупності радіофізичних моделей та даних безперервних метеорологічних спостережень з малими значеннями часового інтервалу їхнього усереднення.

4. Зазначені вище підходи та методи розрахунку поглинання радіохвиль в атмосфері в різних погодних умовах з урахуванням дальності, робочої частоти, типу модуляції та параметрів діаграми спрямованості антен лежать в основі оцінок енергетичного потенціалу різних комбінацій цілого ряду груп системних параметрів проєктованих ліній зв'язку.

В зв'язку з вище описаним планується використовувати комбінування моделей з урахування мікрокліматичних особливосте для зони E в якій знаходиться місто Харків.

2 ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ММ ДІАПАЗОНУ

Даний розділ присвячений вдосконаленню математичної моделі оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку та визначенню граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу з урахуванням діаграм спрямованості антен що дозволить виконувати дослідження в умовах щільної міської забудови.

2.1 Математична модель оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку ММ ДХ

Продуктивність (performance) безпроводових каналів зв'язку визначається їх здатністю передавати дані з високою швидкістю та ефективністю. Вона відображає обсяг інформації, яку канал може передати за певний проміжок часу. Продуктивність безпроводового каналу зв'язку вимірюється в одиницях пропускної здатності (наприклад, бітах в секунду – біт/с або мегабітах в секунду – Мбіт/с).

Висока продуктивність означає, що канал може передавати більше даних за одиницю часу, що дозволяє користувачам відправляти та отримувати дані швидше. Наприклад, високопродуктивний безпроводовий канал зв'язку може забезпечувати високошвидкісний доступ до Інтернету, швидку передачу файлів, відео стрімінг та інші послуги, які вимагають великого обсягу передачі даних.

Поява технологій *WiGig* і нового стандарту бездротової передачі інформації *IEEE 802.11ad* забезпечила значне підвищення швидкості прийомо-передачі даних та широким впровадженням технологій високоякісного відтворення мультимедійної інформації та широким впровадженням технологій високоякісного відтворення відео з високою якістю [73].

ITU (Міжнародна організація зв'язку) розробила рекомендації розрахунку ослаблення сигналу при використанні ММ діапазону у різних кліматичних

зонах. Але, як було сказано у першому розділі, щоб розрахунки були більш точні потрібно у кожному регіоні де буде впроваджуватися 5G проводити додаткові дослідження статистичних даних мікрокліматичного питання і його впливу на ефективність каналу зв'язку ММ ДХ.

Далі в роботі приведено один з можливих сценаріїв побудови мережі 5G в умовах міста (рисунок 2.1). В умовах міста будуть працювати одночасно і взаємодіяти декілька малих сот SC: *Macro-Cell* (радіус дії 1...2 км), *Micro-Cell* (радіус дії 0,5...1 км) та *Pico-Cell* з радіусом дії 0,1...0,5 км.

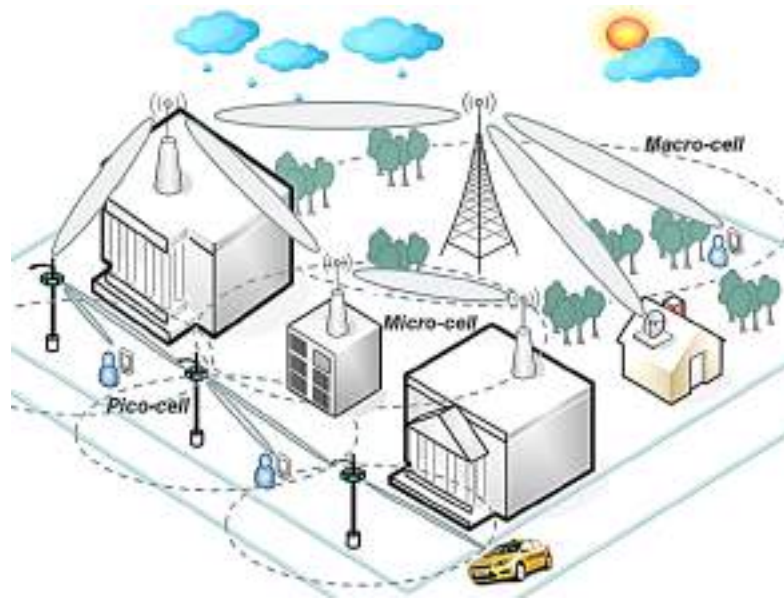


Рисунок 2.1 – Можливий сценарій побудови 5G в умовах міста

Особливістю даного сценарію є застосування міліметрового діапазону хвиль для побудови транспортної мережі і ліній абонентського доступу.

Також вплив на ослаблення сигналу здійснюють стіни будівель [74].

Діапазон 60 ГГц визнаний неліцензійним і його частотне розподілення представлено у таблиці 2.1 для різних країн світу [75].

Таблиця 2.1 – Частотне розподілення неліцензійного діапазону 60 ГГц

Параметр	Країни та регіони світу				
	Північна Америка	Японія	Південна Корея	Австралія	Євросоюз
Діапазон частот, ГГц	57-64	59-66	57-64	59,4-62,9	57-64
Смуга пропускання каналу, ГГц	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Потужність передатчика, dBm	-	10	10	10	27

Еквівалентна ізотропна потужність в антені ($EIRP$), dBm	40 середня 43 пікова	57	57	51,8	40 середня 43 пікова
--	-------------------------	----	----	------	-------------------------

Еквівалентна ізотропна потужність – являє собою інтегральну енергетичну характеристику радіопередавача, яка враховує спрямовані властивості антени.

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX} \quad [dBm], \quad (2.1)$$

де P_{TX} – потужність радіопередавача, dBm ;

G_{TX} – коефіцієнт підсилення передавальної антени dBi .

З формули 2.1 видно що передавач малої потужності з чітко спрямованою антеною може давати такий же рівень радіо-випромінювання що і потужні передавачі зі слабоспрямованими антенами

Для можливості визначення пропускної здатності каналу зв'язку, спочатку потрібно провести і підрахувати оцінку лінії довжиною d , яка враховує потужність радіопередавача $EIRP$, ослаблення радіосигналу ММ ДХ у випадку (60 ГГц) на трасі $PL(d)$, ослаблення киснем $O(d)$, вплив дощу $R(d)$ і підсилення приймальної антени G_{RX} . На рисунку 2.2 показано сценарії використання ММ ДХ (60 ГГц) для різних сегментів мережі.

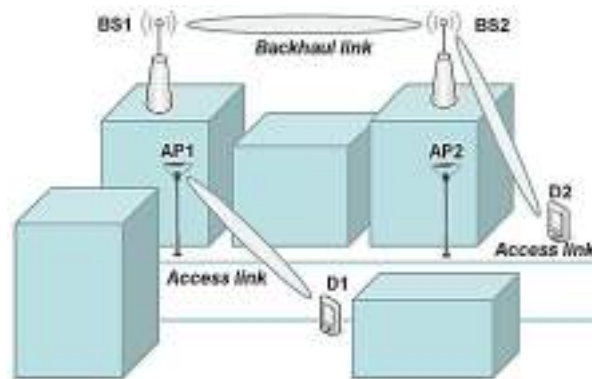


Рисунок 2.2 – Сценарії використання ММ ДХ (60 ГГц) для різних сегментів мережі

Продуктивність безпроводових каналів зв'язку може варіюватися в залежності від різних факторів, таких як технології передачі даних, рівень сигналу, інтерференція та інші. Оператори мобільного зв'язку та провайдери

безпроводового Інтернету намагаються постійно покращувати продуктивність своїх мереж, впроваджуючи нові технології і покращуючи інфраструктуру для забезпечення швидкого та стабільного зв'язку.

Рівень сигналу (signal strength): сильний сигнал дозволяє забезпечити кращу продуктивність, оскільки він зменшує ймовірність помилок передачі даних та підвищує швидкість передачі інформації.

Рівень P_{RX} (сигнал у приймачі) можна представити у вигляді

$$P_{dB}^{RX}(d) = P_{TX} + G_{TX} - PL(d) - O(d) - R(d) + G_{RX} \quad [dB] \quad (2.2)$$

В умовах міста та щільної забудови можна використати дві моделі розрахунків ослаблення радіосигналу ММ ДХ (60ГГц) PL(d) на лінії [76,77]

- пряма видимість;
- вуличний каньйон.

$$PL(d)_{LOS} = 32,5 + 20 \log_{10}(f) + 10n \log_{10}(d/1000) \quad [dB], \quad (2.3)$$

$$PL(d)_{SC} = 82,02 + 10n \log_{10}(d/d_0)|_{d_0=5} \quad [dB], \quad (2.4)$$

де: f – частота сигналу у ГГц;

$n=(2...6)$ – коефіцієнт, який залежить від умов поширення сигналу: $n=2$ для сценарію *LOS*; $n=3-5$ для сценарію *Street Canyon*;

d – відстань між передавачем та приймачем, м;

d_0 – еталонна відстань, $d_0 = 5\text{ м}$.

У таблиці 2.2 наведені величини коефіцієнта n для різних умов поширення.

Таблиця 2.2 – Величини коефіцієнта n для різних умов поширення

Умови поширення	n
Вільний простір	2
Відкритий простір в умовах міста	2,7...3,5
Простір в умовах міста з щільною забудовою	3...5
Всередині приміщень LOS	1,76...1,8
Всередині приміщень NLOS	4...6

При розрахунку бюджету радіолінії ММ ДХ довжиною понад 100 м необхідно враховувати загасання в атмосферних газах (тобто поглинання в

атмосферному кисні O_2) і загасання залежно від інтенсивності опадів.

Рівень поглинання в атмосферному кисні необхідно враховувати на радіотрасах довжиною понад 400 м та на частоті 60 ГГц що складає $O(d)=16 \text{ dB/km}$ Для відстані між передавальною. і приймальною антенами в метровій шкалі $O(d)=16 \cdot d/1000 \text{ [dB/m]}$ [78].

Фактори загасання в дощах $R(d)$ залежать від дощової кліматичної зони і реєструються Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) [79]. Територія України розташована в трьох кліматичних зонах по інтенсивності опадів рисунок 2.3.

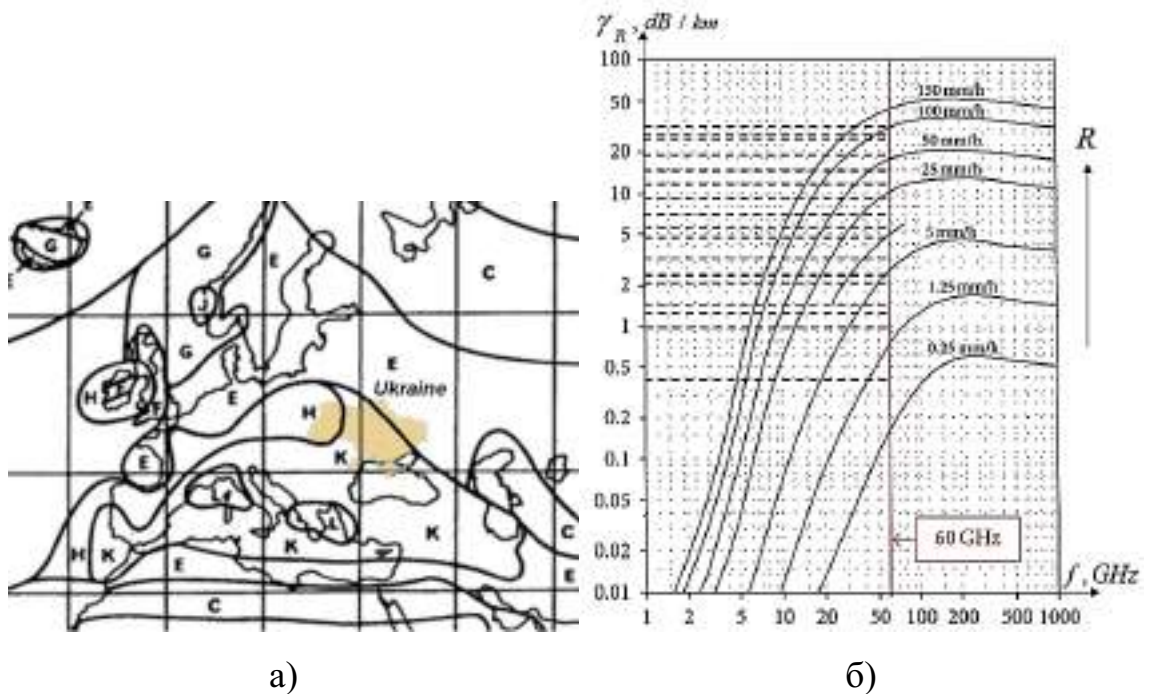


Рисунок 2.3 – Розташування України в трьох кліматичних зонах ITU (а) залежність погонного згасання від частоти сигналу та інтенсивності опадів R (б)

$$R(d) = \gamma_R \cdot d / 1000 \text{ [dB/m]} \quad (2.5)$$

Інтенсивність опадів, наявність хмар і інші локальні метеорологічні чинники атмосфери в ММ ДХ істотно впливають на здатність системи зв'язку забезпечувати передачу інформації із заданими показниками якості. Коефіцієнт готовності каналу зв'язку AR (availability ratio) визначається як відношення часу, коли канал зв'язку знаходиться в стані готовності до періоду

спостереження, яке, як правило, береться рівним одному року (365,25 днів, 8766 годин). Коефіцієнт неготовності NR (unavailability ratio $NR = 1-AR$) – визначається як частка часу, протягом якого тракт (з'єднання) знаходиться в стані неготовності за період спостереження. Період часу неготовності починає відраховуватися з моменту появи послідовності з десяти секунд зі значною кількістю помилок.

У таблиці 2.3 вказані чисельні значення рівнів загасання γ_R в дощі, для трьох кліматичних зон Е (м. Харків), Н (м. Львів), К (м. Київ) при різних показниках готовності лінії радіозв'язку AR.

Для завершення формування параметрів бюджету радіолінії приймемо посилення приймальної антени G_{RX} рівним коефіцієнту посилення передавальної антени G_{TX} .

$$G_{RX} = G_{TX} = EIRP - P_{TX} = 43 - 27 = 16 \quad [dBi] \quad (2.6)$$

Таблиця 2.3 - чисельні значення рівнів загасання γ_R в дощі, для трьох кліматичних зон Е (м. Харків), Н (м. Львів), К (м. Київ)

Відсоток часу простою NR (%)	Готовність лінії AR (%)	Дані інтенсивності опадів за кліматичними зонами і погонного загасання на частоті 60 ГГц					
		Зона Е		Зона Н		Зона К	
		R mm/h	γ_R dB/km	R mm/h	γ_R dB/km	R mm/h	γ_R dB/km
1,0	99,0	0,6	0,4	2,0	1,2	1,5	1,0
0,3	99,7	2,4	1,4	4,0	2,0	4,2	2,2
0,1	99,9	6,0	3,5	10,0	4,9	12,0	7,0
0,03	99,97	12,0	7,0	18,0	8,0	23,0	9,1
0,01	99,99	22,0	9,0	32,0	12,0	42,0	15,0
0,003	99,997	41,0	14,9	55,0	23,0	70,0	26,0
0,001	99,999	70,0	26,0	83,0	29,0	100,0	32,0

Пропускна здатність (bandwidth): це максимальний обсяг даних, які можуть бути передані через канал за певний проміжок часу. Визначається фізичними характеристиками безпроводового каналу та використовуваними технологіями передачі даних (діапазоном частот, видом модуляції і кодування та інше).

Граничну пропускну здатність каналу зв'язку залежно від відстані d_{TX-RX} між передавачем і приймачем, смуги пропускання і співвідношення сигнал/шум, можна оцінити виходячи з формули К.Шеннона [80]

$$C(d) = BW_{60GHz} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_W^{RX}(d)}{N_W} \right) \quad [\text{бит/сек}], \quad (2.7)$$

де $BW = 2.16 \cdot 10^9$ Гц – ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц;

$P_W^{RX}(d) = 10^{(P_{dB}^{RX}(d)/10)}$ – потужність сигналу на вході приймача в Вт на відстані d від передавача;

$N_W = 10^{(N_{dB}/10)}$ – потужність шуму в Вт.

Інтерференція (interference): безпроводові канали можуть бути підвержені різноманітним джерелам інтерференції, таким як інші безпроводні пристрої, електромагнітні смуги, шуми тощо. Інтерференція може знижувати якість сигналу та знижувати продуктивність каналу. Потужність шуму N залежить від різних чинників: діапазону частот, смуги пропускання каналу радіозв'язку і шумів реалізації конкретної системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad [80, 81].

$$N_{dB} = k_B T_c + 10 \log_{10}(BW_{60GHz}) + L_I + n_F \quad [\text{дБ}], \quad (2.8)$$

де: $k_B T_c = -174$ дБ / Гц – спектральна щільність потужності шуму;

BW – ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц;

$L_I = 10$ дБ - загасання при реалізації апаратури стандарту IEEE 802.11ad;

$n_F = 5$ дБ – коефіцієнт шуму апаратури стандарту IEEE 802.11ad.

Тоді для апаратури зв'язку стандарту IEEE 802.11ad отримуємо

$$N_{dB} = -65.6555 \quad [\text{дБ}] \quad \text{та} \quad N_{dB} = 2.72 \cdot 10^{-10} \quad [W]. \quad (2.9)$$

На рисунках 2.4 і 2.5 наведені залежності граничної швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link) і в режимі абонентського доступу (Access link) для трьох кліматичних зон України.

Якщо в якості граничної мінімальної швидкості передачі інформації по каналу зв'язку взяти 2 Гбіт/с (ця швидкість передачі необхідна для трансляції

відео в реальному масштабі часу), то можна визначити максимальний радіус зони обслуговування для базових станцій (Backhaul link) і мобільних абонентів мережі (Access link) залежно від кліматичної зони України. Радіус дії для осередків мікростільникових систем (Micro-Cell): 950 м (зона К); 1000 м (зона Н) і 1050 м (зона Е). Радіус дії для осередків піко стільникових систем (Pico-Cell): 180 м (зона К); 185 м (зона Н) і 190 м (зона Е). Зона покриття (coverage area): продуктивність безпроводного каналу може залежати від площі зони покриття мережі доступу.

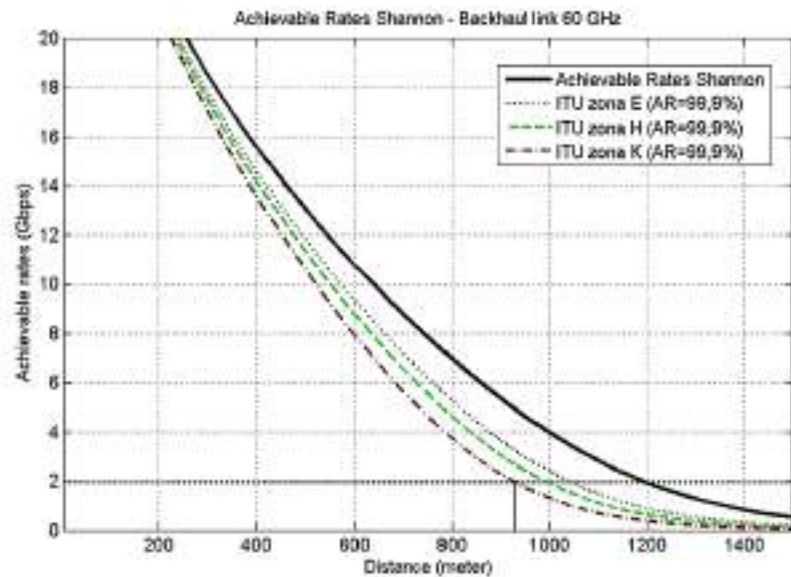


Рисунок 2.4 – Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

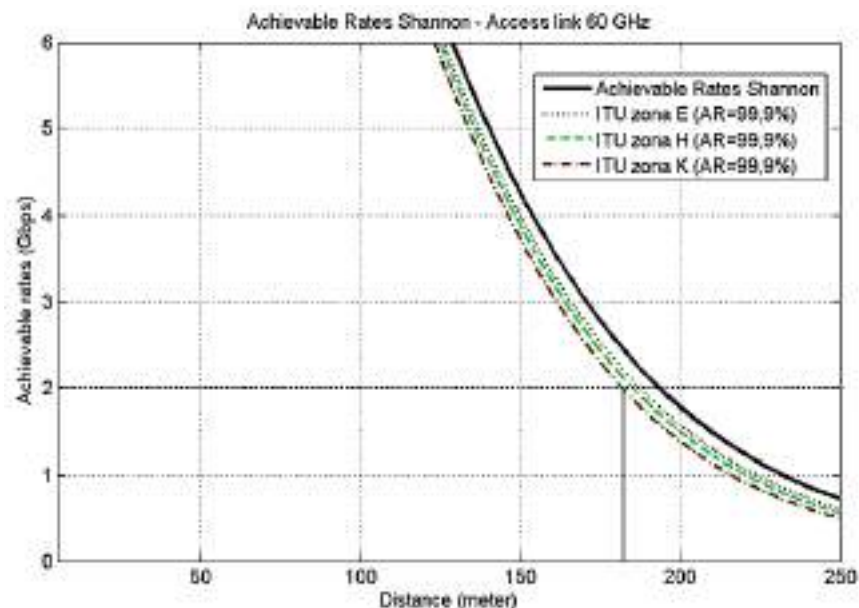


Рисунок 2.5 – Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

Для оцінки реальної пропускної здатності каналу зв'язку на основі існуючих систем необхідно звернутися до стандарту IEEE 802.11ad [81], де вказані рекомендовані модуляційні схеми MCS_i (Modulation and Coding Scheme) для трьох основних режимів роботи обладнання: з використанням однієї несучої SC (Single carrier), ортогонального частотного мультиплексування OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) і режиму з низьким енергоспоживанням LPSC (Low-Power SC).

Для кожного з режимів роботи в стандарті запропоновані різні індекси модуляції, наведені величини чутливості приймача $P_{RX}^{MCS_i}$ і максимальна досяжна при цьому швидкість передачі інформації DR (Data rate).

Протокол передачі даних (data transmission protocol): Різні протоколи передачі даних мають різні швидкості та методи обробки помилок. Наприклад, протоколи 4G та 5G зазвичай надають вищу продуктивність порівняно з попередніми поколіннями, такими як 3G.

У таблиці 2.4 представлені дані про чутливість приймача для режиму роботи з використанням однієї несучої SC [81]. Цей режим є обов'язковим для всіх фірм виробників обладнання.

Таблиця 2.4 - Дані про чутливість приймача для режиму роботи з використанням однієї несучої SC

Схема MCS _i для режиму SC	Чутливість приймача RX $P_{RX}^{MCS_i}$, dBm	Вид модуляції	Швидкість коду	Швидкість передачі даних DR, Мбит/с
MCS0	-78 dBm	DBPSK	3/4	27,500
MCS1	-68 dBm	$\pi/2$ BPSK	1/2	385,00
MCS2	-66 dBm	$\pi/2$ BPSK	1/2	770,00
MCS3	-65 dBm	$\pi/2$ BPSK	5/8	962,50
MCS4	-64 dBm	$\pi/2$ BPSK	3/4	1155,00
MCS5	-62 dBm	$\pi/2$ BPSK	13/16	1251.25

MCS6	-63 dBm	$\pi/2$ QPSK	1/2	1540.00
MCS7	-62 dBm	$\pi/2$ QPSK	5/8	1925.00
MCS8	-61 dBm	$\pi/2$ QPSK	3/4	2310,00
MCS9	-59 dBm	$\pi/2$ QPSK	7/8	2502,50
MCS10	-55 dBm	$\pi/2$ 16QAM	1/2	3080,00
MCS11	-54 dBm	$\pi/2$ 16QAM	5/8	3850,00
MCS12	-53 dBm	$\pi/2$ 16QAM	3/4	4620,00

Якщо розрахована потужність прийнятого сигналу P_{dB}^{RX} вище, ніж чутливість приймача $P_{RX}^{MCS_i}$ з індексом модуляції MCS_i і нижче чутливості приймача $P_{RX}^{MCS_{i+1}}$ з індексом модуляції MCS_{i+1} , то процесор радіомодема IEEE 802.11ad встановлює індекс модуляції MCS_i

$$P_{RX}^{MCS_i} < P_{dB}^{RX}(d) \leq P_{RX}^{MCS_{i+1}} \quad [dBm]. \quad (2.10)$$

Тому, якщо відстань лінії бездротового зв'язку зростає, то $P_{dB}^{RX}(d)$ стає нижче через загасання сигналу (тобто втрати в середовищі поширення, кисню і дощу), то індекс підтримуваних MCS_i також стає нижче і це призводить до зниження швидкості передачі даних по каналу радіозв'язку.

Конкретне значення порогів перемикання $P_{RX}^{MCS_i}$ залежить від цільової функції алгоритму адаптації системи радіозв'язку: підтримка постійної потужності передавача на базовій станції, підтримання максимальної швидкості передачі інформації або підтримання необхідної якості каналу зв'язку.

На рисунках 2.6 і 2.7 наведені залежності швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link) і в режимі абонентського доступу (Access link).

Якщо в якості граничної мінімальної швидкості передачі інформації по каналу зв'язку взяти 1 Гбіт/с системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц, то можна визначити максимальний радіус зони обслуговування для базових станцій (Backhaul link) і мобільних абонентів мережі (Access link). Радіус дії для осередків мікростільників складе 600 м; а радіус дії для осередків піко-стільників – 85 м.

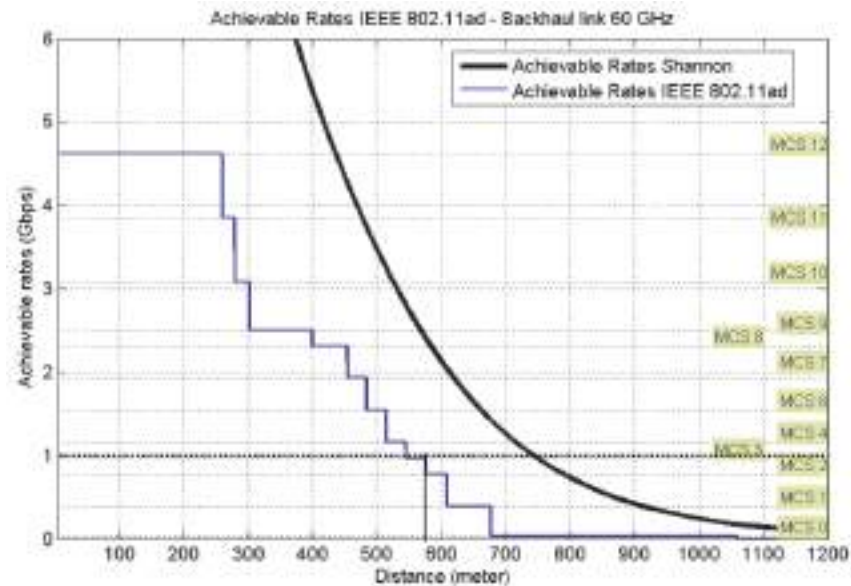


Рисунок 2.6 – Залежність швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link)

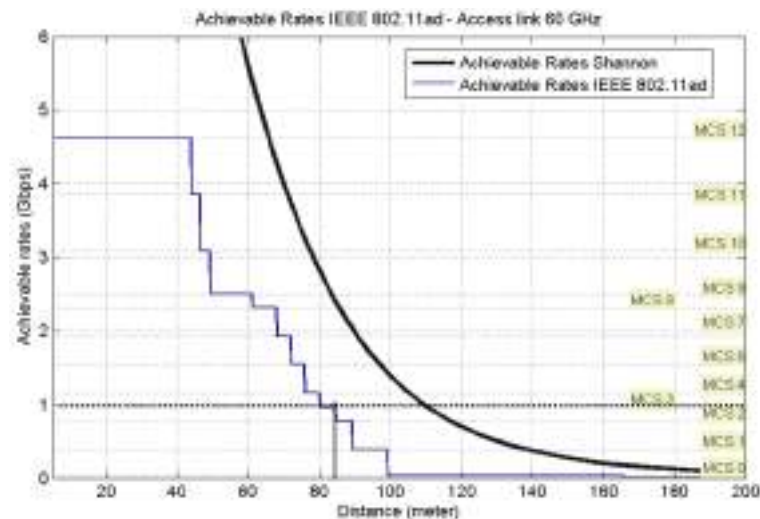


Рисунок 2.7 – Залежність швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі абонентського доступу (Access link)

2.2 Оцінки продуктивності та завадостійкості системи зв'язку з урахуванням діаграм спрямованості антен базових станцій

Розвиток математичної моделі оцінки продуктивності та завадостійкості системи зв'язку, яка відрізняється врахуванням діаграм спрямованості антен

базових станцій, фазових антенних решіток (ФАР) точок доступу та пристроїв користувачів, що дозволяє виконувати дослідження в умовах щільної міської забудови.

Оцінку продуктивності і перешкодозахищеності системи зв'язку необхідно вести з урахуванням діаграм спрямованості антен $G_{mW}(\varphi, \theta)$ базових станцій BSi, точок доступу APj і пристроїв користувачів Dk.

Реальна конструкція антени може мати досить складну діаграму спрямованості, яка ускладнює моделювання каналу зв'язку. Особливо це стосується фазованих антенних решіток з дуже великою кількістю випромінюючих елементів, таких як модульні антенні решітки МАА (Modular Antenna Arrays) [85].

Функція посилення головної пелюстки діаграми спрямованості антени $G_{mW}(\varphi, \theta)$ визначається за допомогою двовимірної функції наступним чином

$$G_{mW}(\varphi, \theta) = G_{mW}^{\max} \cdot \exp(-\alpha \cdot \varphi^2) \cdot \exp(-\beta \cdot \theta^2), \quad (2.11)$$

де φ – азимутальний кут в діапазоні $\{-\pi, +\pi\}$;

θ – кут місця в діапазоні $\{-\pi/2, +\pi/2\}$;

G_{mW}^{\max} – максимальне посилення антени, відповідне напрямку ($\varphi = 0, \theta = 0$);

α і β – константи, які визначаються половинними значеннями ширини променя потужності φ_{3dB} і θ_{3dB} відповідно.

Рисунок 2.9 ілюструє систему визначення координат і кутів.

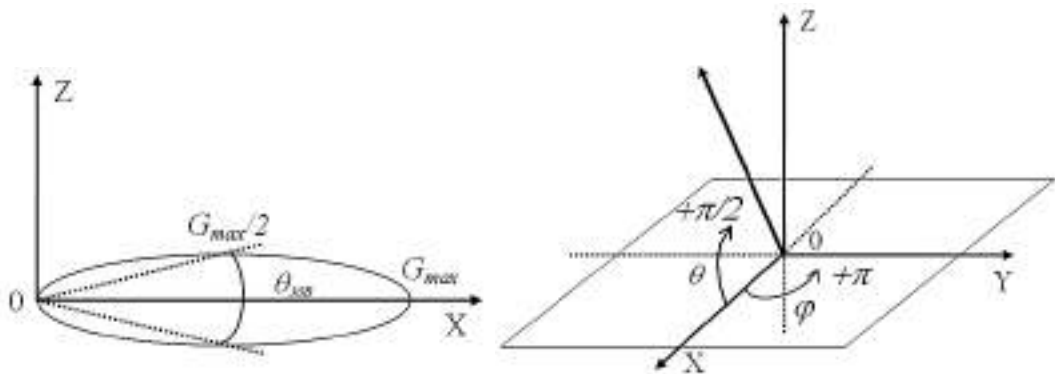


Рисунок 2.9 – Система визначення кутів і координат в азимутальній і вертикальній площинах діаграми спрямованості антени (ДСА)

Ширина променю половинної потужності для азимутального кута φ_{3dB} визначається при $\theta = 0$ і для кута місця θ_{3dB} при $\varphi = 0$ наступним чином [86]

$$\frac{G_{mW}(\varphi, \theta)}{G_{mW}^{\max}} = \exp\left\{-\alpha\left(\frac{\varphi_{3dB}}{2}\right)^2\right\} = 0,5, \quad (2.12)$$

$$\frac{G_{mW}(\varphi, \theta)}{G_{mW}^{\max}} = \exp\left\{-\beta\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right)^2\right\} = 0,5. \quad (2.13)$$

Тоді коефіцієнти α і β можна визначити, використовуючи такі вирази

$$\alpha = \frac{4 \ln 2}{\varphi_{3dB}^2} \quad \text{і} \quad \beta = \frac{4 \ln 2}{\theta_{3dB}^2}. \quad (2.14)$$

На основі представлених формул отримаємо наступний вираз

$$G_{mW}(\varphi, \theta) = G_{mW}^{\max} \cdot \exp\left(-4 \ln(2) \frac{\varphi^2}{\varphi_{3dB}^2}\right) \cdot \exp\left(-4 \ln(2) \frac{\theta^2}{\theta_{3dB}^2}\right). \quad (2.15)$$

Використовуючи вираз $G_{dB}(\varphi, \theta) = 10 \cdot \log_{10}\{G_{mW}(\varphi, \theta)\}$ і з огляду на співвідношення $\log_{10}(e) \cdot 4 \ln(2) \approx 12$ можна отримати вираз для функції посилення головної пелюстки діаграми спрямованості антени $G_{dB}(\varphi, \theta)$ в шкалі дБ

$$G_{dB}(\varphi, \theta) = G_{dBi}^{\max} - 12 \cdot \left(\frac{\varphi^2}{\varphi_{3dB}^2}\right) - 12 \cdot \left(\frac{\theta^2}{\theta_{3dB}^2}\right). \quad (2.16)$$

Кути φ_{3dB} і θ_{3dB} можна обчислити, використовуючи співвідношення для еталонної моделі антени для діапазону 60 ГГц представленої в рекомендаціях ITU-R F.1336-4[87]

$$\theta_{3dB} = \frac{31000 \cdot 10^{\frac{G_{dBi}^{\max}}{10}}}{\varphi_{3dB}}. \quad (2.17)$$

Якщо припустити, що кути рівні $\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB}$, то

$$\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB} \approx \left(31000 \cdot 10^{\frac{G_{dBi}^{\max}}{10}}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.18)$$

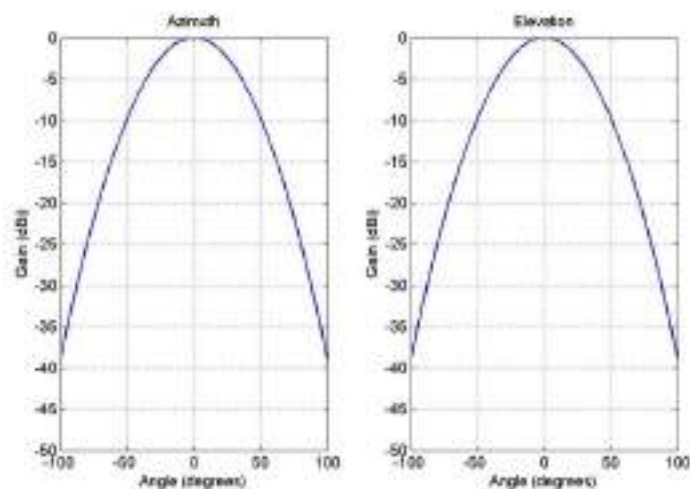
У таблиці 2.5 наведені дані про ширину головного пелюстка в градусах на рівні половинної потужності діаграми спрямованості антени ($\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB}$) залежно від максимального посилення антени G_{dBi}^{\max} .

Таблиця 2.5 - Наведені дані про ширину головного пелюстка в градусах

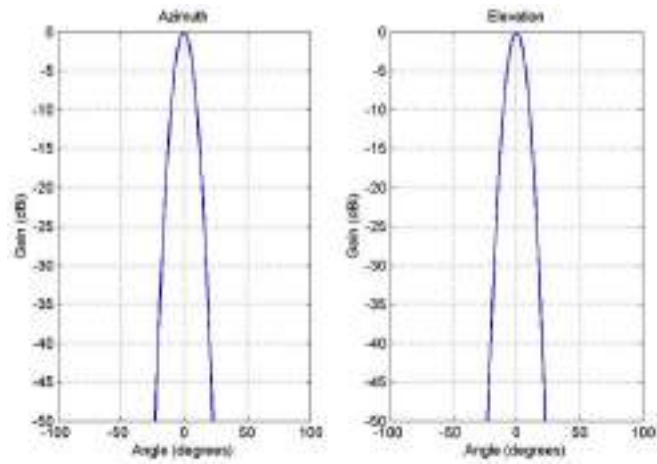
G_{dBi}^{\max} , дБ	$\varphi_{3dB} \approx \theta_{3dB}$, град
10	55,6776
15	31,3098
20	17,6068
25	9,9010
30	5,5677
35	3,1309
40	1,7606
45	0,9901
50	0,5567

Дані в таблиці 2.5. показують, що істотне збільшення енергетичного потенціалу каналу зв'язку в ММ ДХ пов'язано із застосуванням модульних антенних решіток МАА, що дозволяють реалізувати великі значення G_{dBi}^{\max} при малих кутах розкриття ДСА.

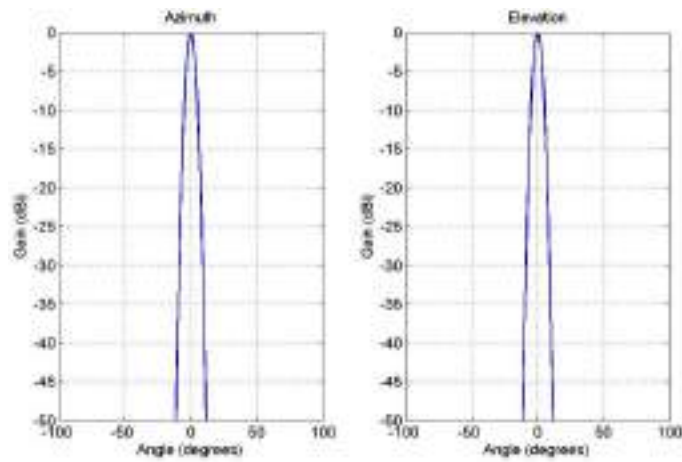
На рисунках 2.10 та 2.11 представлені 2D і 3D діаграми спрямованості антени з гаусовим профілем основної пелюстки при різних значеннях максимального посилення антени G_{dBi}^{\max} .



а)

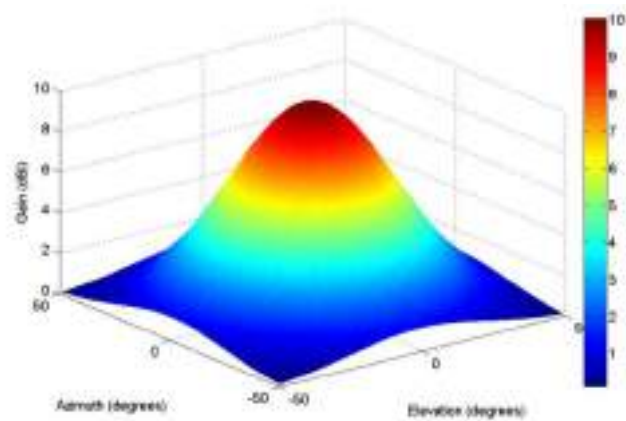


б)

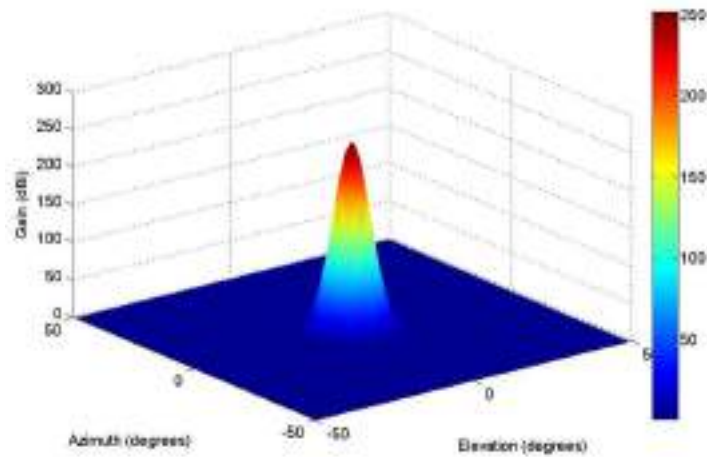


в)

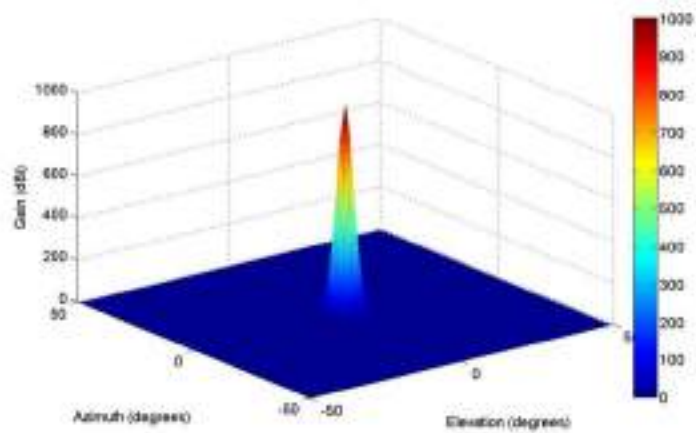
Рисунок 2.10 – 2D діаграми спрямованості антени з гаусовим профілем основного пелюстка з максимальним посиленням антени: а) 10 dBi; б) 24 dBi; в) 30 dBi



а)



б)



в)

Рисунок 2.11 – 3D діаграми спрямованості антени з гаусовим профілем основного пелюстка з максимальним посиленням антени: а) 10 dBi; б) 24 dBi; в) 30 dBi

На рисунках 2.12 і 2.13 наведені залежності граничної швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link) і в режимі абонентського доступу (Access link) залежно від максимального значення посилення антени в головному пелюстку. Представлені залежності отримані без врахування впливу дощу в зоні дії системи зв'язку і впливу інтерференції від інших абонентів, базових станцій і точок доступу.

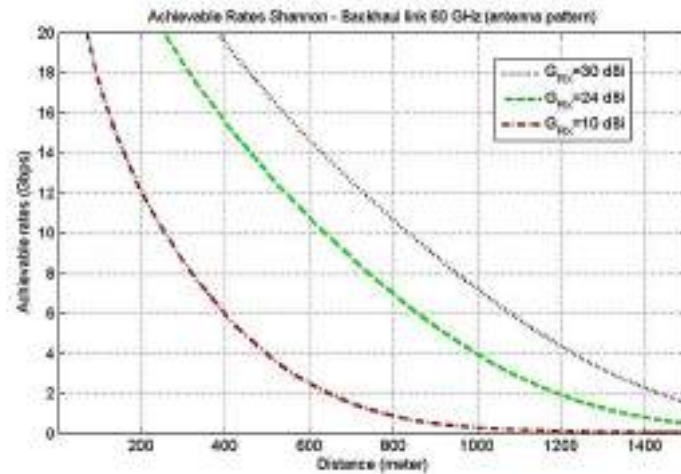


Рисунок 2.12 – Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц залежно від максимального значення посилення антени

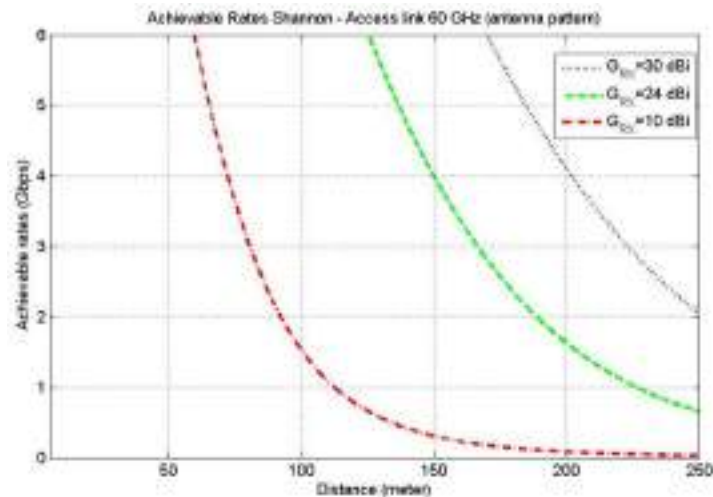


Рисунок 2.13 – - Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц залежно від максимального значення посилення антени

На рисунку 2.14 представлений один з можливих сценаріїв інтерференційного впливу користувальницьких терміналів UDi, точок доступу APi і базових станцій BSk в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц.

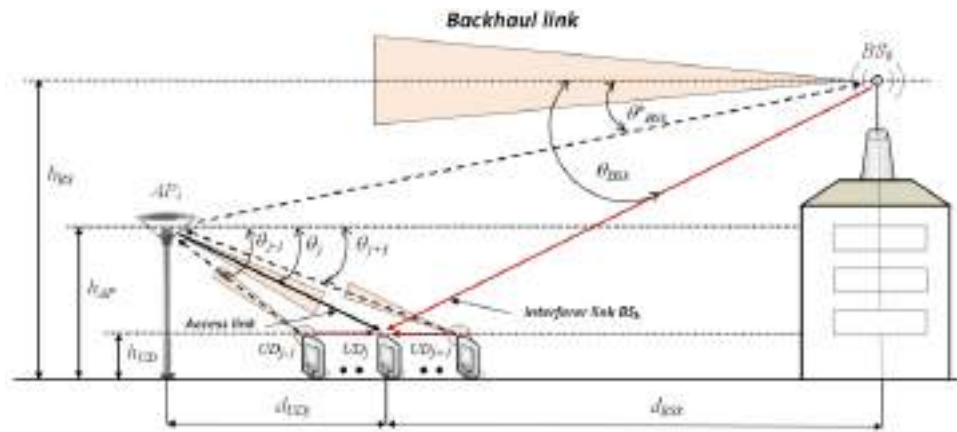


Рисунок 2.14 – Сценарій інтерференційного впливу користувальницьких терміналів (UD) і базових станцій (BS) в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц

Рівень інтерференційного сигналу в точці прийому мобільним абонентом можна представити у вигляді суми, яка визначається кількістю мобільних абонентів поблизу точки прийому основного каналу, з урахуванням діаграм спрямованості як передавальних антен, так і приймальних антен

$$I_{dB}^{RX}(d_{UD}) = \sum_i \left[P_{TX}^{AP_i} + G_{TX}^{AP_i}(\varphi, \theta) - PL(d_{UD}) - O(d_{UD}) - R(d_{UD}) + G_{RX}^{UD_j}(\varphi, \theta) \right] \text{ [dB]} \quad (2.19)$$

$$I_{dB}^{RX}(d_{BS}) = \sum_k \left[P_{TX}^{BS_k} + G_{TX}^{BS_k}(\varphi, \theta) - PL(d_{BS}) - O(d_{BS}) - R(d_{BS}) + G_{RX}^{UD_j}(\varphi, \theta) \right] \text{ [dB]} \quad (2.20)$$

На рисунку 2.15 представлена залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу при інтерференційному впливі користувальницьких терміналів (UD) і базових станцій (BS) в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц.

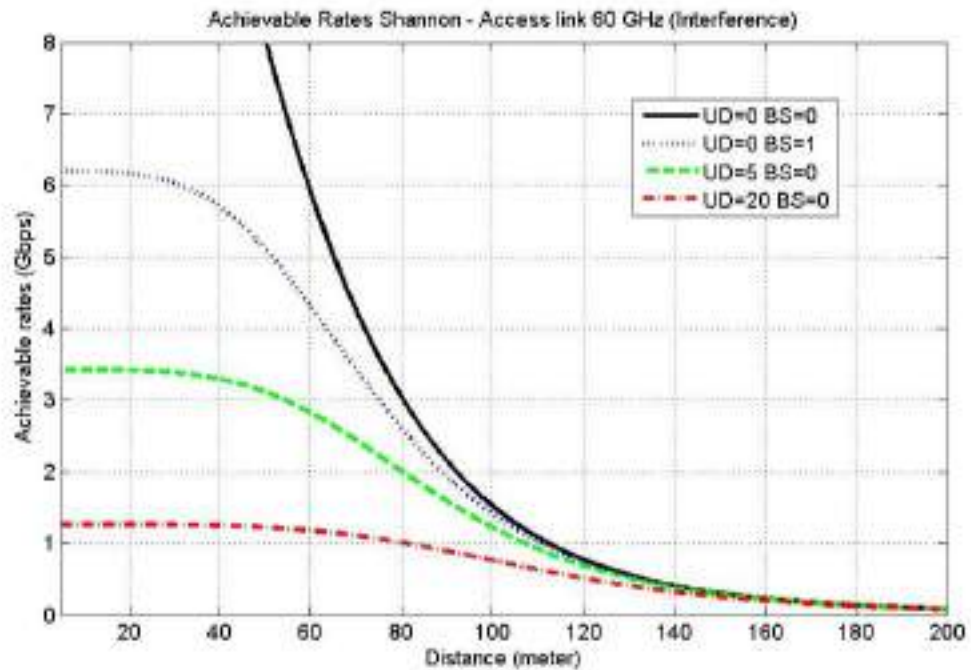


Рисунок 2.15 – Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу при інтерференційному впливу користувальницьких терміналів (UD) і базових станцій (BS) в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц

Завдяки цій моделі були отримані нові дані про енергетичний потенціал ліній зв'язку для відкритого простору (*Outdoor*) з використанням створеної експериментальної приземної лінії зв'язку на основі використання точок доступу *MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit)* у діапазоні 60 ГГц (5 мм), що дозволило та показало реалізованість сценарію розгортання мереж 5G в діапазоні 60 ГГц на базі малих сотів (*Small Cell*).

2.3 Архітектура прямого перетворення, супергетеродинна архітектура

Супергетеродинна архітектура довгий час була стандартним вибором для бездротових мереж. Такі приймачі використовуються завдяки своїй здатності забезпечувати високу вибірковість і чутливість. По суті, приймач перетворює прийняту енергію радіочастотного сигналу в основну смугу частот в кілька етапів, які дають можливість оптимізувати параметри системи на кожному

етапі. На рисунку 2.16 показана блок-схема двоступеневого супергетеродинного приймача.

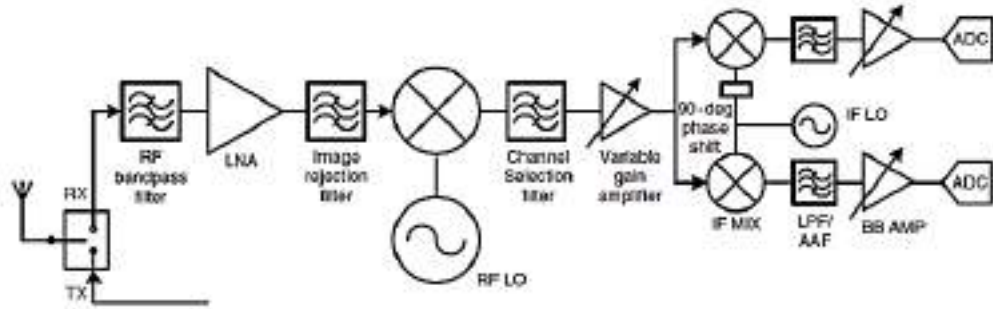


Рисунок 2.16 - Аналоговий інтерфейс супергетеродинного приймача

Смуговий фільтр RF спочатку відхиляє позасмугові сигнали серед радіочастотних сигналів, зібраних антеною. Відфільтровані сигнали потім посилюються малошумливим підсилювачем (LNA). Наступний фільтр пригнічує сигнали, які можуть перекриватися з вихідними сигналами після мікшування. Частота перетворення з пониженням частоти з першим гетеродином переміщує радіосигнали в проміжний частотний (IF) діапазон [88]. Вибір каналу здійснюється за допомогою високоефективних селективних фільтрів, які знижують вимоги до динамічного діапазону на наступних етапах. Підсилювач з автоматичним регулюванням посилення (AGC) регулює рівні сигналу для оптимальної роботи демодулятора. Після поділу на два сигнали, сигнали перетворюються з пониженням частоти. Після додаткового регулювання посилення і фільтрації згладжування, сигнали основної смуги перетворюються в цифрові [89].

2.3.1 Архітектура прямого перетворення

На відміну від супергетеродинної архітектури, архітектура прямого перетворення перетворює прийняті радіочастотні сигнали в базову смугу без будь-якої проміжної стадії. На рисунку 2.17 показана блок-схема приймача прямого перетворення. Після фільтрації та підсилення з низьким рівнем шуму, рівень сигналу регулюється для оптимальної квадратурної демодуляції.

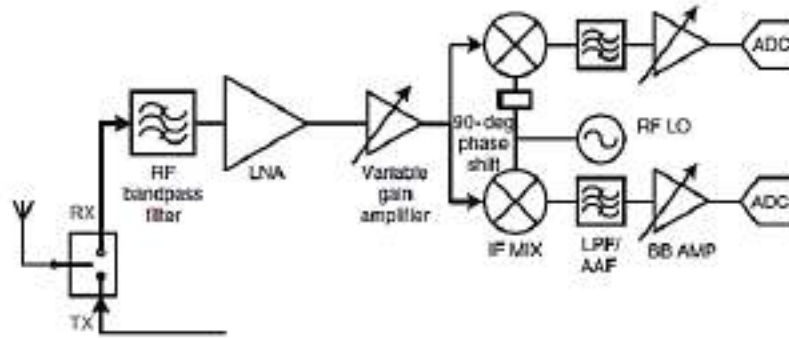


Рисунок 2.17 - Блок-схема приймача прямого перетворення

Ця архітектура простіша і вимагає менше компонентів ніж супергетеродинна архітектура. Це особливо привабливо в мобільних додатках де низьке енергоспоживання є найбільш важливим показником якості. Головним недоліком приймачів прямого перетворення є більш високі вимоги до динамічному діапазону в радіочастотних компонентах, включаючи підсилювачі і змішувачі, оскільки радіочастотні сигнали безпосередньо передаються в базову смугу, і вибір каналу виконується в основній смузі частот.

Висновки по розділу 2

1. Розроблено вдосконалену математичну модель оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку, яка реалізує багатоступеневу апроксимацію ліміту Шеннона та представлена у вигляді комп'ютерної програми в середовищі MATLAB, що дозволяє визначати максимальний радіус зони обслуговування та врахувати: сценарії розгортання системи, параметри кліматичної зони, поглинання в газах, інтенсивність опадів, тип модуляційної схеми та кодування (MCS_i) обладнання.

2. Подальший розвиток отримала математична модель оцінки продуктивності та завадостійкості системи зв'язку в умовах щільної міської забудови, що дозволяє врахувати діаграми спрямованості антен базових станцій, фазових антенних решіток (ФАР) точок доступу та пристроїв користувачів.

3. Розроблено нову багатопроменеву модель поширення радіохвиль ММ ДХ для закритого простору, яка враховує діелектричні характеристики матеріалів стін, полу та стелі, що дозволило отримати теоретичну оцінку досяжних швидкостей передачі інформації для внутрішніх коридорів будівель (*Indoor*) мережі передачі інформації для апаратури стандарту IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції та кодування (*MCS*) і різні типи антен.

4. Приведено залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» та в режимі абонентського доступу (*Backhaul link*) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України.

5. Представлена оцінка впливу діаграм спрямованості антен на пропускну спроможність каналу зв'язку з випромінювання 60 ГГц. Розраховані та побудовані діаграми спрямованості антени з гаусовим профілем основного пелюстка з максимальним посиленням антени: 10 dBi; 24 dBi; 30 dBi. Представлений сценарій інтерференційного впливу користувальницьких терміналів (UD) і базових станцій (BS) в режимі абонентського доступу (*Access link*) 60 ГГц.

3 МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІОМЕТРІЇ АТМОСФЕРИ

Даний розділ дисертаційної роботи присвячений розгляду методичного забезпечення радіометрії для України. Взяті до уваги рекомендації ІТУ стосовно поширення радіохвиль ММ діапазону. Показано метод розрахунку ослаблення через хмарність на похилих трасах на основі цифрових карт світу та місцевих даних. Розглянута проблема загасання в атмосферних газах. Приведено експериментальний підхід вимірів, який заснований на визначенні значень повного вертикального ослаблення за даними безперервного радіометричного моніторингу інтенсивності радіотеплового випромінювання атмосфери в 8 ММ ДХ. Отримано та побудовано кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення γ (дБ) в атмосфері за теплий період року для частоти 39 ГГц.

3.1 Рекомендації ІТУ про поширення радіохвиль в атмосфері

Роль сектору радіозв'язку полягає в забезпеченні раціонального, справедливого, ефективного та економного використання радіочастотного спектра усіма службами радіозв'язку, включаючи супутникові служби, і проведенні в частотному діапазоні досліджень, на основі яких приймаються Рекомендації.

Всесвітні та регіональні конференції радіозв'язку та асамблеї радіозв'язку за підтримки дослідницьких комісій виконують регламентну і політичну функції сектора радіозв'язку.

Асамблея радіозв'язку МСЕ, враховуючи що:

- існує необхідність в забезпеченні інженерів керівництвом з проектування систем електрозв'язку земля-космос на частотах вище 10 ГГц;
- ослаблення через хмарність може бути важливим фактором, особливо для мікрохвильових систем, що працюють на частотах набагато вище 10 ГГц, або для малодоступних систем;

– для розрахунку часових рядів загального ослаблення і для методів просторово-часового прогнозування необхідно аналітичний вираз статистичних даних загального стовбчатого обсягу рідкої води, що міститься в хмарах;

– дані місцевих вимірювань загального стовбчатого обсягу рідкої води, що міститься в хмарах, можуть бути недоступні рекомендує: в разі якщо дані місцевих вимірювань загального стовбчатого обсягу рідкої води, що міститься в хмарах, недоступні, використовувати для прогнозування ослаблення через хмарність і туману Recommendation ITU-R P.837-6 (02/2012);

3.1.1 Розподіл ослаблення через хмарність на похилих трасах на основі цифрових карт світу

Ослаблення через хмарність на похилих трасах, A , для даного рівня ймовірності, p , визначається наступним чином, формули представлені в рекомендації MСE-R P.840-7

$$A = \frac{L_{red} K_l(f, 273,15)}{\sin \varphi} \text{ дБ для } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ, \quad (3.1)$$

де L_{red} - загальний стовпчастий обсяг рідкої води, що міститься в хмарах, з температурою, зниженою до фіксованого значення 273,15 К, L_{red} (кг/м² або, еквівалентно, мм), для даного рівня ймовірності p .

φ - кут місця.

K_l - розраховується за рівнянням (3.2) - (3.11) для температури води 273,15 К.

Для обчислення значення K_l для частот до 200 ГГц можна використовувати математичну модель, засновану на релеєвському розсіюванні, в котрій застосовується двовимірна модель Дебая для діелектричної проникності, $\varepsilon(f)$, води

$$K_l(f, T) = \frac{0,819f}{\varepsilon''(1 + \eta^2)} \left(\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right) / \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right), \quad (3.2)$$

де f – частота (ГГц)

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p[1+(f/f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s[1+(f/f_s)^2]}, \quad (3.4)$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1+(f/f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1+(f/f_s)^2]} + \varepsilon_2, \quad (3.5)$$

де $\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3(\theta - 1)$;

$$\varepsilon_1 = 0,0671\varepsilon_0;$$

$$\varepsilon_2 = 3,52;$$

$$\theta = 300 / T,$$

T – температура рідкої води (К).

Головна частота релаксації, f_p , і вторинна частота релаксації, f_s , визначаються наступним чином

$$f_p = 20,20 - 146(\theta - 1) + 316(\theta - 1)^2 \text{ (ГГц)}, \quad (3.6)$$

$$f_s = 39,8f_p \text{ (ГГц)}. \quad (3.7)$$

Річні значення загального стовбчатого обсягу рідкої води L_{red} (кг/м²) зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, перевищує при рівнях ймовірності 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 і 99 % щодо середньорічних значень, є невід'ємною частиною цієї Рекомендації і доступні в формі цифрових карт.

Місячні значення загального стовбчатого обсягу рідкої води L_{red} (кг/м²) зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, перевищує при рівнях ймовірності 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 і 99 % щодо середньомісячних значень, є невід'ємною частиною цієї Рекомендації і доступні в формі цифрових карт.

Дані наведені від 0° до 360° по довготі і від +90° до -90° по широті з дозволом 1,125° за широтою та довготою. Загальний стовпчастий обсяг рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, в будь-якому бажаному місцезнаходження на поверхні Землі може бути отриманий за допомогою наступного методу інтерполяції:

– визначити дві ймовірності, P_{above} і P_{below} , більшу і меншу бажаної ймовірності p , з набору: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90,

95 і 99 % для річних статистичних даних і з набору: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 і 99 % для місячних статистичних даних;

– для двох ймовірностей, P_{above} і P_{below} , визначити загальний стовпчастий обсяг рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, L_{red1} , L_{red2} , L_{red3} , L_{red4} , в чотирьох найближчих вузлових точках;

– визначити загальний стовпчастий обсяг рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, $L_{redabove}$ і $L_{redbelow}$, при ймовірності P_{above} і P_{below} шляхом виконання білінійної інтерполяції значень загального столбчатого обсягу рідкої води зі зниженою температурою, L_{red1} , L_{red2} , L_{red3} , L_{red4} в чотирьох вузлових точках, як описано в Рекомендації МСЕ-R P.1144 [90];

– визначити загальний стовпчастий обсяг рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, L_{red} , при бажаній ймовірності, p , шляхом інтерполяції $L_{redabove}$ і $L_{redbelow}$ залежно від P_{above} і P_{below} до p за лінійною шкалою L_{red} залежно від $\log p$.

3.1.2 Ослаблення через хмарність на похилих трасах на основі місцевих даних

Ослаблення через хмарність на похилих трасах, A , визначається наступним чином (рекомендація МСЕ-R P.840-7)

$$A = \frac{LK_l(f, 273, 15)}{\sin \varphi} \text{ (дБ) для } 90^\circ \geq \varphi \geq 5^\circ, \quad (3.8)$$

де L – загальний стовпчастий обсяг рідкої води, що міститься в хмарах ($\text{кг}/\text{м}^2$ або, еквівалентно, мм),

φ – кут місця,

K_l розраховується наступним чином

$$K_l * (f, T) = \frac{0,819 * (1,9479 * 10^{-4} * f^{2,308} + 2,9424 * f^{0,7436} - 4,9451)}{\varepsilon * (1 + \eta^2)} \text{ (дБ/км)/(г/м}^3\text{)}, \quad (3.9)$$

Річні статистичні дані загального столбчатого обсягу рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, можуть бути апроксимовані

за допомогою логарифмічно нормального розподілу. Цифрові карти середніх значень m , стандартного відхилення σ і ймовірності загального стовпчатого обсягу рідкої води з температурою, зниженою до ненульового значення, P_{clw} , параметри логарифмічно нормального розподілу є невід'ємною частиною цієї Рекомендації і доступні в формі цифрових карт.

Загальний стовпчастий обсяг рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, в будь-якому бажаному місцезнаходженні на поверхні Землі може бути отриманий за допомогою наступного методу інтерполяції:

– визначити параметри $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, PCLW1, PCLW2, PCLW3$ и $PCLW4$ в чотирьох найближчих вузлових точках;

– визначити загальний стовпчастий обсяг рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, $Lred1, Lred2, Lred3, i Lred4$, для бажаної ймовірності, p , в чотирьох найближчих вузлових точках, виходячи з параметрів $m_1, m_2, m_3, m_4, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, PCLW1, PCLW2, PCLW3$ і $PCLW4$ наступним чином

$$L_{red,i} = e^{mi + \sigma_i * Q^{-1} * (\frac{P}{P_{clwi}})} \quad \text{для } i = 1, 2, 3, 4, \quad (3.10)$$

– визначити загальний стовпчастий обсяг рідкої води зі зниженою температурою, що міститься в хмарах, шляхом здійснення білінійної інтерполяції чотирьох значень загального стовпчатого обсягу рідкої води зі зниженою температурою, $Lred1, Lred2, Lred3$ і $Lred4$, в чотирьох вузлових точках, можна з Рекомендації МСЕ-Р Р.1144.

3.2 Загасання в атмосферних газах

Погонне загасання в сухому повітрі і за рахунок водяної пари для будь-яких значень тиску, температури і вологості на частотах до 1000 ГГц найбільш точно розраховується методом підсумовування резонансних ліній кисню і водяної пари, в який введено додаткові невеликі за величиною коефіцієнти, що враховують нерезонансний, або дебаєвський, спектр поглинання киснем на

частотах нижче 10 ГГц, поглинання молекулами азоту при певному тиску на частотах вище 100 ГГц і додаткове поглинання в смугі безперервного поглинання водяною парою, знайдене експериментальним шляхом. На рисунку 3.1 [91] показано погонне загасання, розраховане за допомогою методу прогнозування для частот від 0 до 1000 ГГц з кроком 1 ГГц, при тиску 1013,25 ГПа, температурі 15 °С, щільності водяної пари 7,5 г/м³ (стандартна атмосфера) і для сухої атмосфери (сухе повітря).

Близько частоти 60 ГГц при тиску на рівні моря безліч ліній поглинання в кисні зливаються, утворюючи одну широку смугу поглинання, що в деталях показано на рисунку 3.1. На цьому ж рисунку показано загасання за рахунок кисню в більш високих шарах атмосфери, де зі збільшенням висоти тиск зменшується і стають помітні окремі лінії поглинання. Ряд додаткових видів молекул (наприклад, види ізотопів кисню, коливально порушені молекули кисню, озон, види ізотопів озону, коливально порушені молекули озону та інші незначні види молекул) не враховуються при використанні методу прогнозування шляхом підсумовування спектральних ліній. Ці додаткові спектральні лінії несуттєві для звичайної атмосфери, проте можуть бути важливі при сухій атмосфері. На рисунку 3.2. показано погонне загасання в діапазоні 50...70 ГГц на зазначених висотах, розраховане з кроком 50 МГц.

Погонне загасання в газах визначається наступним чином

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = \frac{0,1820f(N''_{\text{кисень}} + N''_{\text{водяна пара}}(f))_{\text{дБ}}}{\text{км}}, \quad (3.11)$$

де γ_o і γ_w – погонні загасання (дБ/км), обумовлені сухим повітрям і водяною парою відповідно,

f – частота (ГГц),

$N''_{\text{кисень}}(f)$ і $N''_{\text{водяна пара}}(f)$ – уявні частини частото-залежних комплексних рефракцій

$$N''_{\text{кисень}}(f) = \sum i(\text{кисень})S_i F_i + N''_D(f), \quad (3.12)$$

$$N''_{\text{водяна пара}}(f) = \sum i(\text{водяна пара})S_i F_i, \quad (3.13)$$

де S_i – інтенсивність i -ї спектральної лінії кисню або водяної пари,

F_i – коефіцієнт форми лінії кисню або водяної пари;

N''_D – безперервний спектр для сухого повітря, обумовлений поглинанням азоту при певному тиску, як задано рівнянням.

Інтенсивність лінії визначається наступним чином

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] \quad \text{для кисню,} \quad (3.14)$$

$$= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3,5} \exp[b_2(1 - \theta)] \quad \text{для водяної пари.} \quad (3.15)$$

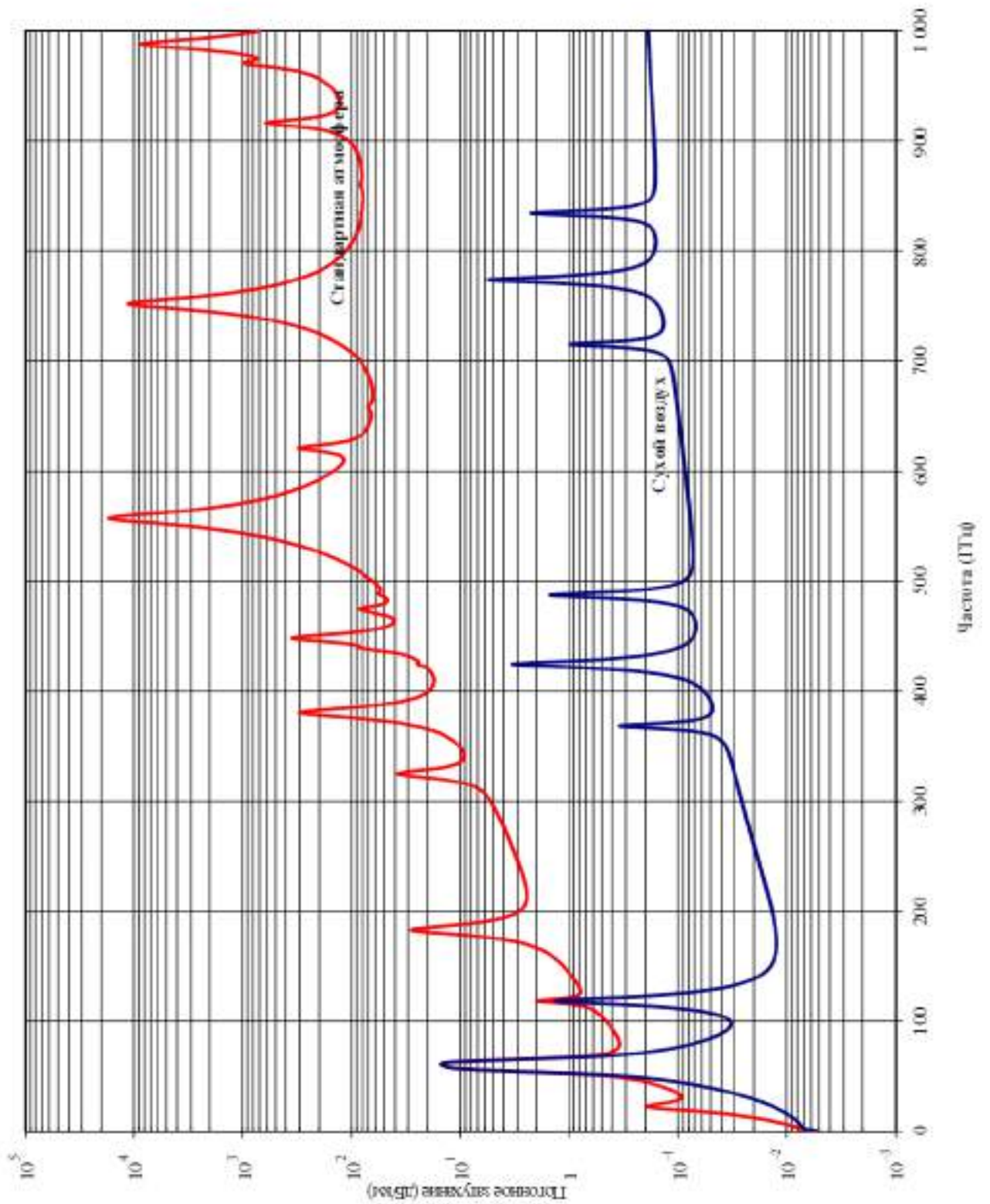


Рисунок 3.1 – Погонне загасання в атмосферних газах, розраховане з кроком 1 ГГц, включаючи центри ліній поглинання

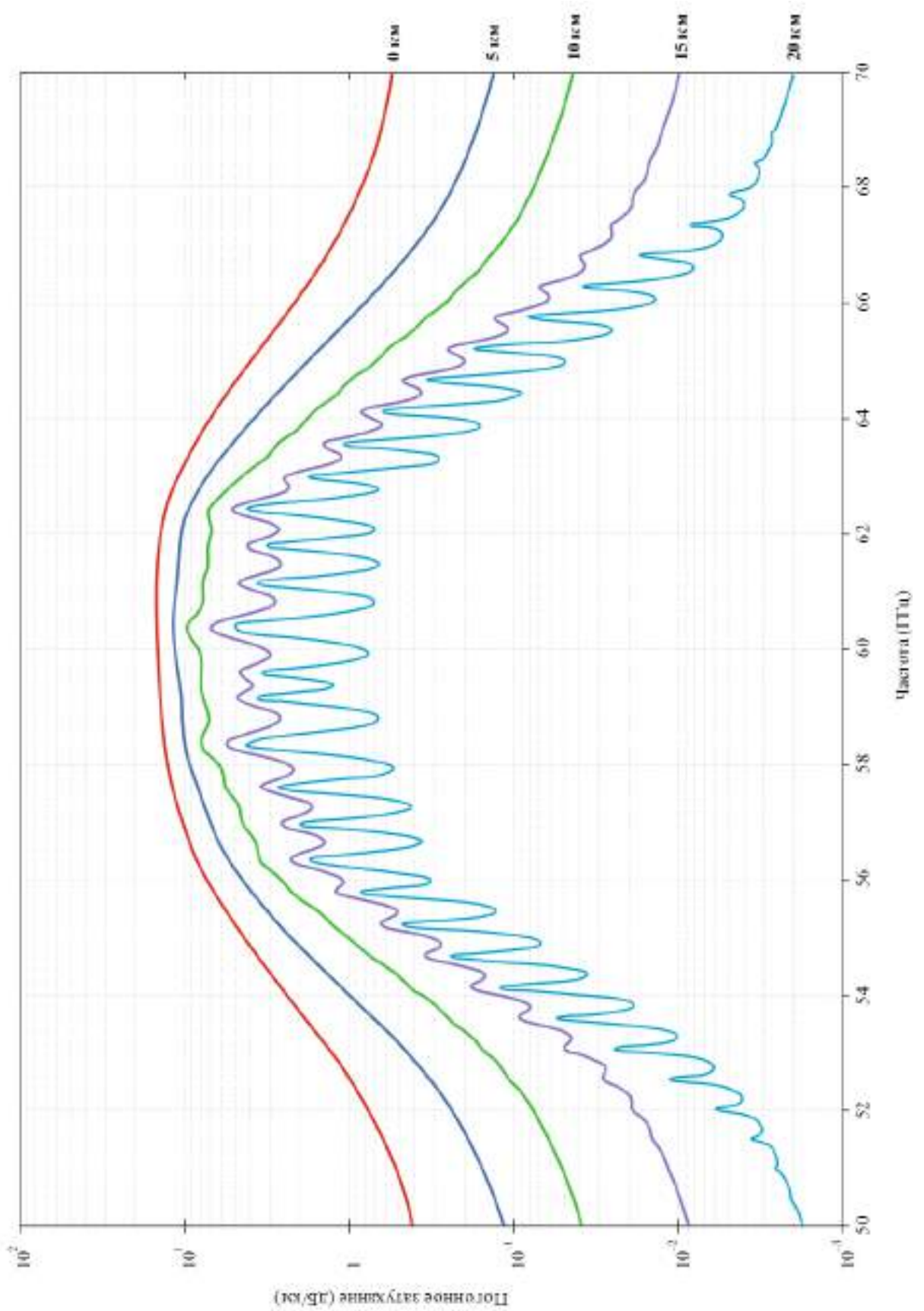


Рисунок 3.2 – Погонне загасання в діапазоні 50...70 ГГц на зазначених висотах, розраховане з кроком 50 МГц, включаючи центри ліній поглинання (0 км, 5 км, 10 км, 15 км і 20 км)

Парціальний тиск водяної пари, e , на висоті можна розрахувати виходячи з значень щільності водяної пари, ρ , і температури, T , на цій висоті, використовуючи наступну формулу

$$e = \frac{pT}{216,7} \quad (3.16)$$

Коефіцієнт форми спектральних ліній визначається за формулою

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right], \quad (3.17)$$

де f_i – частота лінії кисню або водяної пари, а Δf – ширина лінії

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} (p\theta^{(0,8-a_4)} + 1,1e\theta) \quad \text{для кисню}, \quad (3.18)$$

$$= b_3 \times 10^{-4} (p\theta^{b_4} + b_5 e\theta^{b_6}) \quad \text{для водяної пари}. \quad (3.19)$$

Ширина спектральної лінії, Δf змінюється для обліку зєємановського розщеплювання ліній кисню і доплерівського розширення ліній водяної пари

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \times 10^{-6}} \quad \text{для кисню}, \quad (3.20)$$

$$= 0,535\Delta f + \sqrt{0,217\Delta f^2 + \frac{2,1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad \text{для водяної пари}, \quad (3.21)$$

δ – поправочний коефіцієнт, обумовлений інтерференцією спектральних ліній кисню

$$\delta = (a_5 + a_6\theta) \times 10^{-4} (p + e)\theta^{0,8} \quad \text{для кисню}, \quad (3.22)$$

$$= 0 \quad \text{для водяної пари}. \quad (3.23)$$

Смуга безперервного поглинання в сухому повітрі є наслідком існування нерезонансного, або дебаєвського, спектра кисню на частотах нижче 10 ГГц і, при певному тиску, загасання за рахунок азоту на частотах вище 100 ГГц.

$$N_D''(f) = fp\theta^2 \left[\frac{6,14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p\theta^{1,5}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right]. \quad (3.24)$$

3.3 Кумулятивний розподіл

Кумулятивний розподіл погонного ослаблення в дощах (дБ/км) показує ймовірність перевищення того чи іншого значення атмосферного ослаблення. Його досить просто визначити за допомогою наявних радіофізичних моделей, якщо відомо статистичний розподіл інтенсивності дощів p (R) (ймовірність p , для якої величина інтенсивності дощів більше R). При цьому треба мати на увазі, що для цих цілей необхідне використання метеоданих з однохвилинним інтервалом усереднення. Зважаючи на важливість отримання максимально адекватних оцінок прогнозування надійності зв'язку, ІТУ рекомендує здійснювати облік мікрокліматичних особливостей розглянутих регіонів шляхом експериментального накопичення сезонної і річної статистики атмосферного ослаблення з однохвилинним інтервалом усереднення. У ряді країн світу довготривалі цикли такого роду експериментальних досліджень вже проведені або проводяться.

Для території України такі експериментальні дані про кумулятивних функціях повного вертикального і погонного горизонтального атмосферного ослаблення в ММ ДХ відсутні. Також відсутні такі метеорологічні дані, необхідні для адекватного розрахунку статистики ослаблення радіохвиль, як тимчасовий розподіл водозапасу хмар і однохвилинне інтенсивності дощів.

Вихідні дані для побудови експериментально обґрунтованих кумулятивних функцій розподілу повного вертикального ослаблення радіохвиль СМ і ММ ДХ на похилих трасах можна отримати трьома шляхами:

- шляхом визначення значень повного атмосферного ослаблення на похилих трасах методами радіометрії на окремих частотах;
- методом бекон-зондування атмосфери шляхом її просвічування в сюжеті ДХ за допомогою передавачів геостаціонарних супутників;
- розрахунковим шляхом на основі виміряних кумулятивних функцій інтенсивності дощів з використанням регіонально залежних моделей для розмірів дощових осередків і просторової неоднорідності хмарної вологи,

ефективної довжини шляху і ефективної висоти дощу, які рекомендовані для цих завдань ITU-R.

Відсутність відповідного для цих цілей геостаціонарного супутника з променем опромінення території України, а також похибки розрахункового методу внаслідок сумарних похибок групи використовуваних моделей робить перший шлях отримання потрібних даних більш привабливим.

Вихідні дані для побудови експериментально обґрунтованих кумулятивних функцій розподілу приземного погонного ослаблення радіохвиль СМ і ММ ДХ можна отримати двома шляхами:

- експериментально, шляхом набору довготривалої статистики безперервної зміни горизонтального погонного атмосферного ослаблення на приземних точка-точка лініях. Дослідження довготривалих даних показали, що, як правило, відповідний для практичного використання період безперервного накопичення таких даних становить 3...7 років;

- розрахунковим шляхом, на основі експериментальних даних про розподіл дощу з застосуванням радіофізичних моделей адекватно пов'язують інтенсивність дощу з величиною погонного ослаблення в тому чи іншому діапазоні хвиль.

Незважаючи на те, що перший шлях вважається кращим з точки зору точності проведених оцінок, його істотним недоліком є відносна складність підготовки та реалізації такої тривалої програми безперервних точка-точка радіофізичних спостережень.

До переваг досить широко використовуваного в світі другого підходу можна віднести наявність багаторічних баз даних, що містять інтенсивності опадів, що випали, завдяки мережі метеостанцій, а також наявність радіофізичних моделей, які досить точно описують величину погонного ослаблення для різних інтенсивностей дощу в різних діапазонах радіохвиль (як правило, від 5 % в районі 10 ГГц до 30 % на частотах близько 1000 ГГц).

До недоліків цього підходу варто віднести те, що в переважній більшості баз багаторічних даних значення інтенсивності дощу представлені з часом

усереднення (T) від 20 до 60 хвилин. У той час, як для розрахунків загасання на трасі визнані найбільш придатними однохвилинний періоди усереднення інтенсивності дощу. Ця обставина викликає необхідність перерахунків T-хвилинних в 1 хвилинні дані, шляхом використання додаткових моделей, які також мають мікрокліматичні особливості, що може призводити до додаткових похибок. Тому, більш точне рішення в цьому підході бачиться у використанні сучасних автоматизованих дощомірів з 1-хвилинним часом інтегрування для довготривалого накопичення статистичної інформації про інтенсивність дощів в даному регіоні.

3.4 Умови технічного забезпечення та обмеження

Готовність (availability) безпроводного каналу зв'язку відноситься до його доступності та здатності до передачі даних в будь-який момент часу. Вона вказує на те, наскільки надійно та стабільно працює безпроводний канал зв'язку і чи готовий він приймати та передавати дані.

Готовність безпроводного каналу може включати такі аспекти:

1. Стан мережі (network status): готовність безпроводного каналу залежить від стану мережі. Це включає наявність достатньої пропускної здатності, стабільність сигналу та інші фізичні параметри, які впливають на якість передачі даних.

2. Доступність послуг (availability of services): готовність безпроводного каналу означає, що користувачі можуть отримувати доступ до певних послуг, таких як мобільний доступ до Інтернету або передача голосових дзвінків. Це передбачає наявність вільного каналу та ресурсів для обслуговування запитів користувачів.

3. Здатність до передачі даних (data transmission capacity): готовність безпроводного каналу включає його здатність передавати дані з необхідною швидкістю та якістю. Вона залежить від технології передачі даних, швидкості передачі, пропускної здатності та ефективності протоколів передачі даних.

4. Мінімальна затримка (latency): Готовність безпроводного каналу також враховує мінімальну затримку, яка виникає під час передачі даних через мережу. Низька затримка важлива для реалізації вимог реального часу, наприклад, для голосових дзвінків чи інтерактивних додатків.

Для отримання даних для розрахунку готовності каналів зв'язку ММ ДХ потрібно враховувати наступні умови технічного запезпечення.

Основним компонентом загасання критично важливих для зв'язку сигналів є дощ. Загальний внесок газів, пари, туману та снігу в загасання атмосфери на горизонтальних трасах за наявності дощу не перевищує 10...30 %. Дані у вигляді річної ймовірності значень опадів надаються в більшості попередніх досліджень опадів для використання в моделях ослаблення. Однак щорічна статистика може вводити в оману, оскільки в більшості місць події критичної інтенсивності дощу (які викликають перебої в лінії зв'язку) зосереджені лише в певні місяці року. Низька річна ймовірність перерв зв'язку через дощ може бути неприпустимо високою в ці місяці. Тому щомісячна або сезонна статистика, крім середньорічних розподілів значень ймовірності інтенсивності дощу, повинна враховуватися.

В роботі було використано обчислювальний підхід для побудови кумулятивної функції специфічного загасання в діапазоні ймовірностей, критичних для розриву зв'язку, який базується на експериментальних даних про часовий розподіл інтенсивності дощу. Вимірювання інтенсивності дощу проводилися безперервно протягом 4 місяців 2018 року (червень-вересень) та того ж періоду 2019 року, використовуючи автоматизовану бездротову метеостанцію TFA OPUS з 5-хвилинним режимом усереднення опадів.

Розрахунок питомого ослаблення в дощі проводився за допомогою моделі MPM, яка забезпечує похибку менше 5 % для робочих частот нижче 100 ГГц.

В якості критерію відключення зв'язку через дощ, наприклад, може бути використана порогова інтенсивність дощу, перевищення якої спричиняє загальне ослаблення 15 дБ на шляху 1 км для розглянутих тут частот 12 ГГц, 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц.

3.5 Апаратно-методичне забезпечення та умови спостереження.

Визначення характеристик повного вертикального ослаблення в атмосфері

При розробці і реалізації методів зменшення завмирань, таких, як управління потужністю, рознесення, кодування і спільне використання ресурсів в ММ ДХ особливе значення має знання статистичних параметрів опадів і купчастих типів хмарності. Їх необхідно враховувати при визначенні продуктивності цифрових мереж, що використовують супутникові лінії зв'язку. Тривалість завмирання або інтервал часу, протягом якого ослаблення сигналу перевищує заданий поріг, інтервали між епізодами завмирання, інтервали між подіями завмирання і швидкість зміни загасання є найбільш важливими динамічними характеристиками, що відносяться до моделювання супутникової системи.

У дисертації було використано експериментальний підхід, який заснований на визначенні значень повного вертикального ослаблення за даними безперервного радіометричного моніторингу інтенсивності радіотеплового випромінювання атмосфери в 8 ММ ДХ.

Виміри проводилися цілодобово в фіксованому напрямку 35 градусів від зеніту. Калібрування радіометра здійснювалася методом двох навантажень з контрольованими термодинамічними температурами навколишнього середовища і кипіння рідкого азоту. Флуктуаційна чутливість радіометра діапазону 39 ГГц модуляційного типу становила 0.2 К. Інтервал вибірки даних – 10 с. При аналізі отриманих даних в якості критерію порушення зв'язку було використано порогові значення загального загасання на похилій трасі близько 15 дБ [92].

Розрахунок значень повного вертикального ослаблення атмосферою був проведений за допомогою таких рівнянь

$$T_a = T_o - S\Delta U_a , \quad (3.27)$$

де T_a – антенна температур;

S – калібрувальний коефіцієнт радіометра;

ΔU_a – різниця вихідних показників радіометра, антена якого спрямована в узгоджене навантаження і в небо

$$T_a = T_{\text{я}}(1 - \beta) + T_{\text{ф}}\beta + 2,73e^{-\tau \text{Sec}\theta}, \quad (3.28)$$

де $T_{\text{я}} = T_{\text{еф}}(1 - e^{-\tau \text{Sec}\theta})$ – радіояркісна температура;

$T_{\text{ф}}$ – усереднена величина радіояркості фонового випромінювання (для нашої антени використовували в літніх умовах значення близько 170K);

β – параметр, що характеризує розсіювання антени поза основної пелюстки діаграми спрямованості (виміряне значення для нашої антени 0,045);

2,73 – реліктове випромінювання космосу;

θ – зенітний кут візування (35 градусів).

Усереднена величина ефективної температури стовпа атмосфери для літніх умов похмурої погоди значення близько 288K;

Оптична товщина атмосфери τ (Непер) була визначена як

$$\tau = \ln \left(T_{\text{еф}} - \left(\frac{T_a - T_{\text{ф}}\beta}{T_{\text{еф}} - 2,73} \right) \right) / \text{Sec}\theta. \quad (3.29)$$

Величина повного вертикального атмосферного ослаблення визначалася як γ (Дб) 4,343 τ .

У більшості попередніх досліджень атмосферного ослаблення на лініях зв'язку наводяться дані у вигляді річних ймовірностей перевищення значень цих параметрів. Проте, статистичні дані за річний період спостережень можуть вводити в оману, оскільки в більшості місць події екстремально високого ослаблення сигналу (величина якого може викликати перебої в лінії зв'язку) зосереджені тільки в окремі періоди року. Низька середньорічна частота виникнення перебоїв зв'язку (наприклад, через дощ або потужної хмарності) може бути неприпустимо високою в ці місяці. Тому доцільно використовувати щомісячні або сезонні статистичні дані про інтенсивність дощу [93].

У загальному випадку тривалість надмірних завмирань сигналу на похилій трасі є функцією частоти, кута місця і типу дощу або купчастої хмарності. При заданому порозі ослаблення сигналу тривалість критичного

завмирання буде збільшуватися зі збільшенням частоти і зі зменшенням кута місця на похилій трасі. Одним із найбільш часто використовуваних статистичних інструментів для прогнозування рівня ослаблення сигналу на трасі є кумулятивні функції розподілу (cumulative distribution function) для будь-якого часового інтервалу [94...96].

Отримані експериментальним шляхом і представлені на рисунках 2.16...2.18 залежності дають можливість провести оцінний перерахунок і для інших частот і кутів візування. При перерахунку значень ослаблення з частоти 39 ГГц на інші частоти слід мати на увазі, що в більшості випадків спостерігається комбінований ефект різних механізмів ослаблення (головним чином за рахунок дощу і хмар) з відмінною частотною залежністю для крапельної вологи хмар і дощу. Отже, виникає необхідність проводити такі частотні порівняння, обмежуючись лише одним з послаблюючих ефектів. Так, при використанні систем з низьким запасом на завмирання, загасання через хмари на частотах ММ ДХ також може бути значним. Водозапас великих купчастих хмар в середніх широтах протягом року, за оцінками рекомендації ІТУ-R P.840-6 не перевищує 2 кг/м^2 з ймовірністю $p = 99,9 \%$.

Отримані розрахунки показують, що, наприклад, на частотах близько 12 ГГц такий водозапас викликає вертикальне загасання не більше 0,2 дБ. Однак, використовуючи співвідношення МРМ (Millimeter-wave Propagation Model) моделі [97], можна показати, що, наприклад, для температур хмарних крапель $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ на частотах 19, 39 і на 94 ГГц значення ослаблення виростуть в 2,5, 10 і 40 разів відповідно. У міру збільшення кута візування до 85° від зеніту, значення ослаблення на кожній частоті можуть збільшитися ще до 12 разів відповідно до величини $\text{Sec}\theta$.

Для аналогічних оцінок частотної і кутової залежності ослаблення сигналу в дощі для даного регіону можна використовувати пропоновані ІТУ-R P.837-7 моделі. Відповідно до них з імовірністю 99,99 % інтенсивність дощу не повинна перевищувати 35 мм/год. Для такої інтенсивності дощу зростання вираженого в децибелах ослаблення сигналу на частотах 19, 39 і 94 ГГц в порівнянні з частотою 12 ГГц складе 2,6; 9,5 і 16 разів відповідно. Тут корисно

звернути увагу на близькість коефіцієнтів частотного перерахунку для хмарних крапель і крапель дощу в частотному діапазоні нижче 40 ГГц. Ця обставина дозволяє розраховувати на адекватність проведення оцінок ослаблення шляхом такого перерахунку. При перерахунку в більш високочастотні діапазони точність оцінок в загальному випадку може знизитися багаторазово через необхідність і труднощі поділу вкладів дощу і хмар. Однак, в окремому випадку, в секторі екстремально високих значень ослаблення, які характеризуються значеннями ймовірності p менш 0,01 % адекватний перерахунок атмосферного ослаблення на частоти вище 40 ГГц також можливий.

На рисунку 3.3 приведена кумулятивна функція значень повного вертикального (в напрямку зеніту) ослаблення усереднена для теплого періоду року (квітень - жовтень).

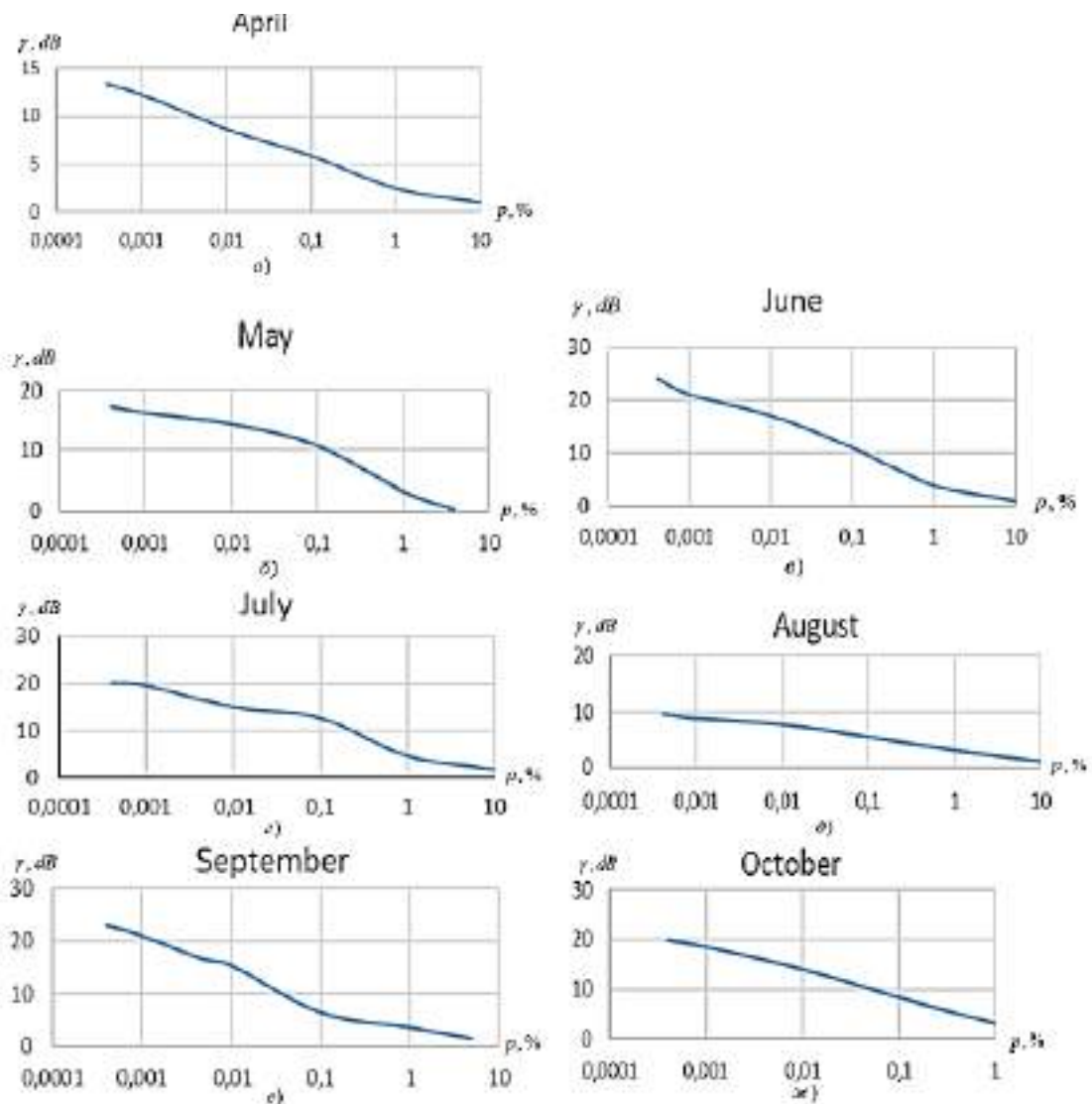


Рисунок 3.3 – Щомісячний кумулятивний розподіл значень повного вертикального ослаблення γ (дБ) в атмосфері для частоти 39 ГГц (м.Харків)

На рисунку 3.4 показаний сезонний хід перевищення зазначених значень атмосферного ослаблення для трьох значень ймовірностей p (0,1; 0,01 і 0,001 %).

У міру зміни кута візування оцінювані значення ослаблення в дощі на кожній частоті можуть збільшитися, як і в разі хмар відповідно до величини близької до значень $\text{Sec } \theta$.

На рисунку 3.5 показаний сезонний хід перевищення значень повного вертикального ослаблення в атмосфері γ в діапазоні 39 ГГц для значень помісячних ймовірностей p 0,1%; 0,01 і 0,001 %

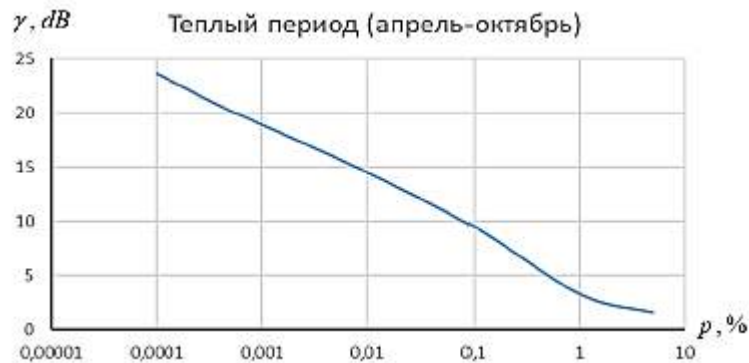


Рисунок 3.4 – Кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення γ (дБ) в атмосфері за теплий період року для частоти 39 ГГц



Рисунок 3.5 – Сезонний хід перевищення значень повного вертикального ослаблення в атмосфері γ в діапазоні 39 ГГц для значень помісячних ймовірностей p 0,1%; 0,01 і 0,001 %

На рисунку 3.6 як приклад, наведено Кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення γ (дБ) в атмосфері для частоти 39 ГГц (червень, Харків).

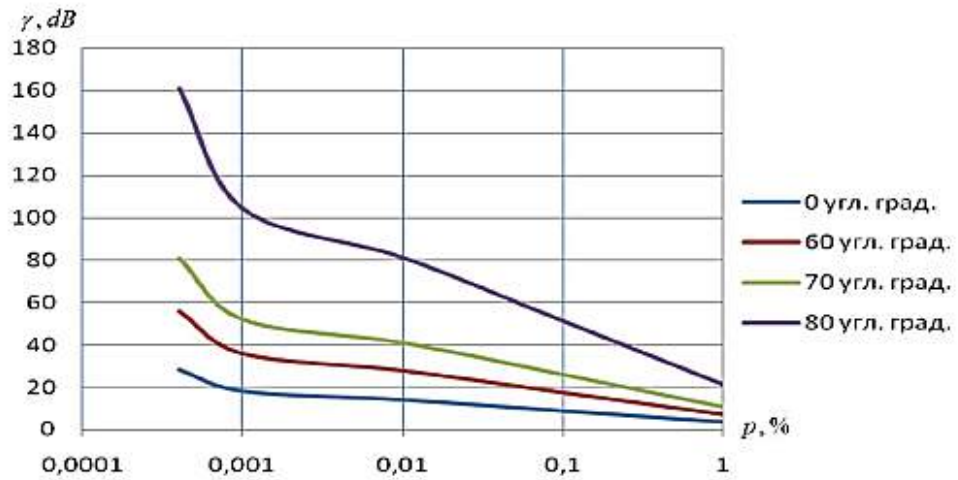


Рисунок 3.6 – Кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення γ (дБ) в атмосфері для частоти 39 ГГц (червень, Харків) для кутів 0 градусів, 60 градусів, 70 і 80 градусів від зеніту

Проведений аналіз отриманих результатів оціночних розрахунків показують, що в погодних умовах червня в зенітному напрямку для ймовірностей p до 0,01 % повне вертикальне ослаблення в атмосфері не повинно перевищувати 15 дБ значення на частотах нижче 40 ГГц. Однак при використанні кутів візування істотно віддалених від зеніту, перевищення цього умовно обраного порога буде швидко наростати в міру збільшення кута θ на похилих трасах, а також у міру збільшення робочих частот. На відміну від результатів, отриманих в теплий період року, для однорічного періоду розгляду в секторі значень ймовірностей нижче 1 %, слід очікувати майже дворазове зменшення значень ймовірності перевищення дБ порогів, які обрані для оцінок порушення зв'язку. Це пов'язано з тим, що в листопадовий-березневий період максимальні значення повного вертикального ослаблення з ймовірністю $p = 0,001$ % не перевищували 3,5 дБ (в листопаді <2 дБ, в грудні, в січні і в лютому <3,5 дБ, в березні <2 дБ).

Питання міжрічної мінливості тривалості подій опадів, що викликають

перебої зв'язку, а також питання адекватності ІТУ формул перекладу Т-хвилинних даних про інтенсивність дощу в 1-хвилинні для конкретно розглянутих регіонів України вимагають проведення додаткових досліджень в інтересах розвитку мереж тропосферного та супутникового зв'язку в ММ ДХ.

Висновки по розділу 3

1. Створено оригінальний програмно-апаратного радіометричного комплексу для частоти 40 ГГц (8мм) та розроблено нову методику проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом (1 хвилина та менше), що дозволило після відповідної статистичної обробки результатів вимірювань отримати дані про кумулятивні функції сезонного розподілу повного вертикального атмосферного послаблення продовж року та у найгірші місяці року для забезпечення надійного зв'язку в розглянутому діапазоні частот.

2. Розроблені засоби радіометрії дали можливість вперше отримати кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ ДХ за річний період та помісячно, що забезпечують оцінку надійності високошвидкісних наземних та наземно-космічних каналів зв'язку в Україні.

3. Розглянуто рекомендації ІТУ про поширення радіохвиль в атмосфері та показано, що для розрахунку готовності-неготовності ліній зв'язку потрібно мати дані кількості опадів з коротким часом інтегрування.

4. Приведено методи розрахунків для розподілу ослаблення через хмарність на похилих трасах на основі цифрових карт світу. Показано, що не маючи даних отриманих на місцях побудови ліній, можна використовувати дані з цифрових карт, але дані з них можуть бути застарілі, та не достатньо точні дані.

5. Представлені методи розрахунків ослаблення ММ ДХ через хмарність на похилих трасах на основі місцевих даних та показано що кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення ММ ДХ не перевищує 160 дБ.

6. Розглянуто та проаналізовано найпопулярніші на сьогодні у світі методи розрахунків загасання ММ ДХ в атмосферних газах.

7. Розроблена модель розрахунку значень повного вертикального ослаблення ММ ДХ атмосферою, що дозволило отримати кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення ММ ДХ.

4 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ РІЧНИХ ЦІЛОДОБОВИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИСОКИМ ЧАСОВИМ ДОЗВОЛОМ

Даний розділ дисертаційної роботи присвячений розробці методики проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом. Розроблена радіометрична система для проведення річних експериментальних досліджень. Розроблено програмний комплекс для виводу цифрового сигналу на ПК (завдяки АЦП). Розроблено багатопроменеву модель поширення радіохвиль ММ ДХ для закритого простору. Отримано кумулятивний розподіл інтенсивності дощів за 4-х місячний період 2018 та 2019 роки. Порівняно результати отримані експериментально в місті Харкові з даними ІТУ, що дозволило зробити висновки про важливість врахування найгірших місяців з точки зору розповсюдження радіохвиль ММ ДХ. Якщо враховувати тільки середньорічні дані виникає велика ймовірність зривів в роботі ліній. Отримано сукупний розподіл питомого загасання атмосфери за 4-місячний період 2018 та 2019 для 12ГГц, 28ГГц, 38ГГц, 60 ГГц та 94ГГц. Розроблено нову багатопроменеву модель поширення радіохвиль ММ ДХ для закритого простору, яка відрізняється врахуванням діелектричних характеристик матеріалів стін, полу та стелі, що дозволило отримати теоретичну оцінку досяжних швидкостей передачі інформації для внутрішніх коридорів будівель

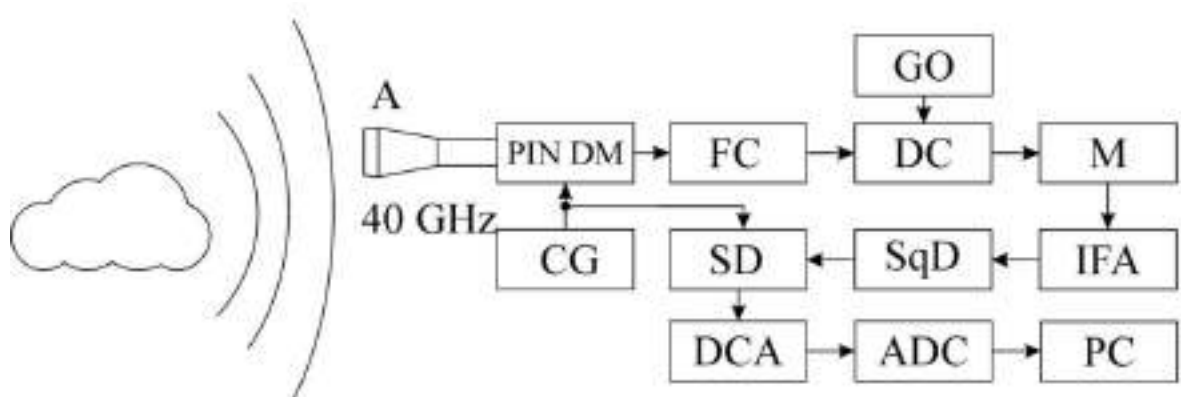
4.1 Радіометрична система для проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом

В даний час в Україні відсутні програми проведення безперервного моніторингу термо- та гідродинамічних характеристик тропосфери: ефективної температури хмар, загального вмісту водяної пари та краплинної вологи. Важливість безперервних змін викликана тим, що в атмосфері, крім стійких

метеоутворень, спостерігаються і швидкоплинні процеси, що впливають на якість розв'язання задач метеорології та радіоастрономії. Врахування впливу таких швидкоплинних процесів неможливо отримати з дискретних відомчих запусків технологічних радіозондів та окремих наукових експериментів з використанням дистанційних акустичних та оптичних приладів. Не менш важливим завданням є визначення статистики значень та флуктуацій повного вертикального ослаблення радіохвиль міліметрового діапазону. Ці відомості є важливими для розвитку наземно-космічних систем зв'язку, у тому числі для впровадження нового покоління телекомунікаційних технологій 5G формату в різних регіонах України.

Виходячі в вище сказаного була поставлена задача розробки методики проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом (1 хвилина та менше) з використанням оригінального програмно-апаратного радіометричного комплексу для частоти 40 ГГц (8мм), що дозволило після відповідної статистичної обробки результатів вимірювань отримати нові дані про кумулятивні функції сезонного розподілу повного вертикального атмосферного послаблення продовж року та у найгірші місяці року для забезпечення надійного зв'язку в розглянутому діапазоні частот.

На рисунку 4.1 показана структурна схема вимірювального комплексу.



А – антена, PINDM – PIN діодний модулятор, FC – феритовий циркулятор, М – змішувач, GO – осцилятор на діоді Ганна, IFA – підсилювач проміжної частоти, SqD – квадратичний детектор, SD – синхронний детектор, DCA – підсилювач постійного струму, ADC – аналого-цифровий перетворювач, PC – персональний комп'ютер

Рисунок 4.1 – Структурна схема програмно-апаратного вимірювального

радіометричного комплексу 40 ГГц (8мм)

Радіометр 40ГГц (8мм) ММ ДХ побудований за модуляційною схемою з приймачем супергетеродинного типу, в якому використовується двосмуговий режим прийому.

Радіометрична система передбачає можливість переведення радіометра з режиму вимірювань радіояркості в режим поляризаційних вимірювань, при якому на виході радіометра виділяється сигнал різниці температур радіояркості між вертикальною і горизонтальною поляризаціями.

Технічне забезпечення поляриметричного режиму роботи здійснюється за рахунок використання як модулятора спеціальних феритових Y-перемикачів навантажених на дві антени, налаштовані на прийом різних поляризацій. Вихідний сигнал такого радіометра характеризує величину відмінностей радіояркості температури об'єкта, на який спрямовані обидві антени.

Як допоміжне обладнання до складу вимірювального комплексу входять РС для обробки даних та калібрувальні навантаження, виконані у вигляді оригінальної 3-х шарової конструкції з високоефективного радіопоглинаючого матеріалу, що складається з голчасто-сітчастої килимової структури типу «Ворс», радіопоглинаючого шару об'ємної структури, виготовленого у вигляді полотна трикотажного переплетення, а також шару нецелюлозного (кремнієвоволоконного) паперу типу АРР з профільованою поверхнею.

Як антена радіометра з центральною частотою налаштування приймача 40ГГц (8мм) використаний діагональний рупор з апертурою 50×50 мм², що забезпечило ширину діаграми спрямованості (ДС) близько 5° при УБЛ -18 дБ та кросполяризаційному рівні -14 дБ. Модулятор на PIN діоді U-7.2.242011 забезпечує в смузі (39...42)ГГц втрати сигналу менше 0.5 дБ, а величина втрат перемикаючого феритового Y-циркулятора становить прямому напрямку 0.4 дБ при зворотних втрат більше 20 дБ. Цей циркулятор виконує функції вентиля під час роботи системи у звичайному режимі радіометра та функції модулятора сигналів від двох ідентичних антен з різною поляризацією при роботі в режимі радіометра-поляриметра.

Після Y-циркулятора прийнятий сигнал потрапляє на вхід спрямованого

хвилеводного відгалужувача, що має втрати сигнального каналу 0.5 дБ при спрямованості -18 дВ і втратах в каналі гетеродина -14 дБ. До виходу направленого відгалужувача підключений змішувач з резонаторною камерою зниженого перерізу хвилеводу, в якій розташований змішувальний діод з бар'єром Шоттки безкорпусного типу.

Як гетеродин використаний генератор Ганна з вихідною потужністю близько 15мВт на частоті 40 ГГц. Резонаторна камера гетеродина є відрізком стандартного хвилеводу 8мм з вбудованим в нього діодом марки «AAA 727В». Резонаторна камера навантажена з одного боку на циліндричний резонатор, а з іншого боку з'єднана з феритовим циркулятором, через який сигнал гетеродина проходить до направленого відповідача.

З виходу змішувача сигнал проміжної частоти надходить на малошумний попередній підсилювач та каскади ІФА, які виконані на стандартних модулях УТР-5. Смуга пропускання вузла ІФА 500...1000МГц за коефіцієнта посилення близько 60 дБ.

До виходу ІФА підключений квадратичний детектор, з якого зашумлений НЧ сигнал частоти модуляції надходить на синхронний детектор та інтегратор, потім через DCA проходить до пристрою ADC і комп'ютера.

На рисунку 4.2 показані конструктивні елементи, які використовуються при побудові радіометра 94ГГц (3мм) ММ ДВ: антена (1), феритовий циркулятор (2), PIN діодний модулятор (3), змішувач (4), гетеродин на діоді Ганна (5). Елементи НВЧ тракту були виготовлені на дослідному виробництві ІРЕ НАНУ (м. Харків, Україна).



Рисунок 4.2 – Конструктивні елементи, використані при побудові радіометра ММ ДХ

Отже, відзначимо, що загальні НВЧ втрати сигналу у вхідному тракті радіометра склали близько 2 дБ. Оцінна величина втрат перетворення змішувача близька до 7 дБ.

Вибрані схемні та апаратні рішення забезпечили вимірюну методом двох навантажень флуктуаційну чутливість побудованого радіометра близько 0.2 К, що знаходиться у відповідності з проведеними розрахунковими оцінками цього основного параметра радіометра [98].



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд радіометру діапазону 40 ГГц (8 мм)
кафедри РТІКС ХНУРЕ

Головними критеріями вибору схемних і технічних рішень крім забезпечення прийнятної для поставлених завдань чутливості (не гірше 0.3 К, що відповідає можливості ідентифікації мінливості атмосферного ослаблення менше 0.005 дБ) перевага віддавалася мінімізації вартості використовуваної елементної бази при забезпеченні надійності вимірювального комплексу (з міркувань його широкомасштабного використання у гідрометеорології).

До складу кінцевої НЧ частини вимірювального комплексу також входять мікропроцесорний пристрій для збору та попередньої обробки вимірювальної інформації. Знімання даних здійснюється як із виходу квадратичного детектора, і традиційно з виходу синхронного детектора радіометра. Перший режим використовує підвищення оперативності варіювання параметрами інтегрування і законами модуляції (демодуляції) вхідного сигналу радіометра, і навіть реалізації режимів оптимальної обробки [99].

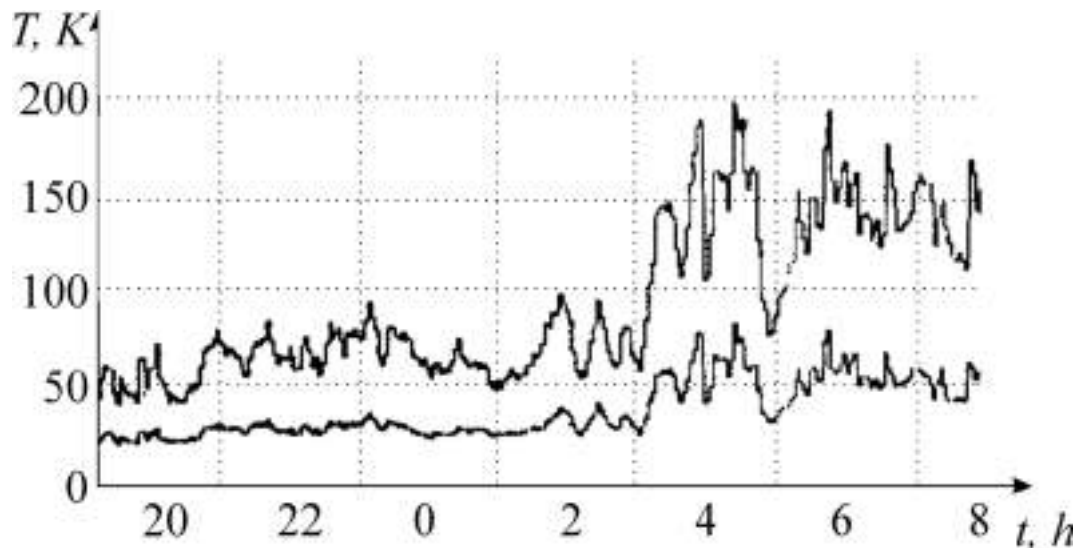


Рисунок 4.4 – Зміни радіояскравості неба в діапазонах 40ГГц (нижня крива) та 94ГГц (верхня крива) при проходженні атмосферного фронту

Розроблений дослідний зразок вимірювального комплексу успішно пройшов лабораторні та натурні випробування. На рисунку 4.4 показано фрагмент запису зміни радіояркості неба на 94 ГГц (верхня крива) та 40ГГц під час проходження фронтальної зони хмарності з 7 вечора до 8 години ранку. Представлені на цьому рисунку дані про радіояскравість неба дозволяють відновити динаміку зміни значень повного вертикального ослаблення в атмосфері, значення ефективної температури краплинної вологи у хмарному покриві, а також значення водозапасу та вологозапасу хмар.

4.2 Програмний комплекс для побудови кумулятивної функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ діапазону

Особливість штатного режиму цифрової обробки сигналів в радіометрі в тому, що для забезпечення апаратним параметрами флуктуаційної чутливості використовується 16-ти розрядний АЦП фірми AnalogDevice типу ADS1115, а джерело опорної напруги і вбудований підсилювач дозволяють вимірювати малі напруги без обмежень на дозвільну здатність АЦП.

АЦП ADS1115 являє собою 4-х каналний 16-бітний аналого-цифровий

перетворювач з максимальною частотою дискретизації 860SPS [100]. Зв'язок АЦП із платформою Arduino nano здійснюється за I2C інтерфейсом.

Платформа Arduino nano отримує дані з АЦП, після чого передаються на персональний комп'ютер (ПК). Структурна схема модуля комунікації представлена на рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – Структурна схема модуля комунікації між радіометром та ПК

Для обробки даних на персональному комп'ютері (ПК) було розроблено спеціальну програму інтерфейс якої показано на рисунку 4.6. За допомогою цієї програми можна записувати параметри радіометра в .xls форматі, паралельно можна включити виведення графіка за отриманими даними, що у свою чергу дає наочно побачити зміни параметрів радіометра від часу.

Після того як відкрили програму, необхідно вибрати COM порт, по якому підключена наша платформа Arduino nano, вибрати швидкість порту (у нашому випадку 9600). Далі необхідно натиснувши на кнопку «Вибір книги» вказати порожній заздалегідь створений .xls файл, вказуємо напрямок запису в .xls файл вертикально або горизонтально, так само як додаткова можливість, передбачений вибір рядка зі стовпця з якого буде розпочинатися запис даних.

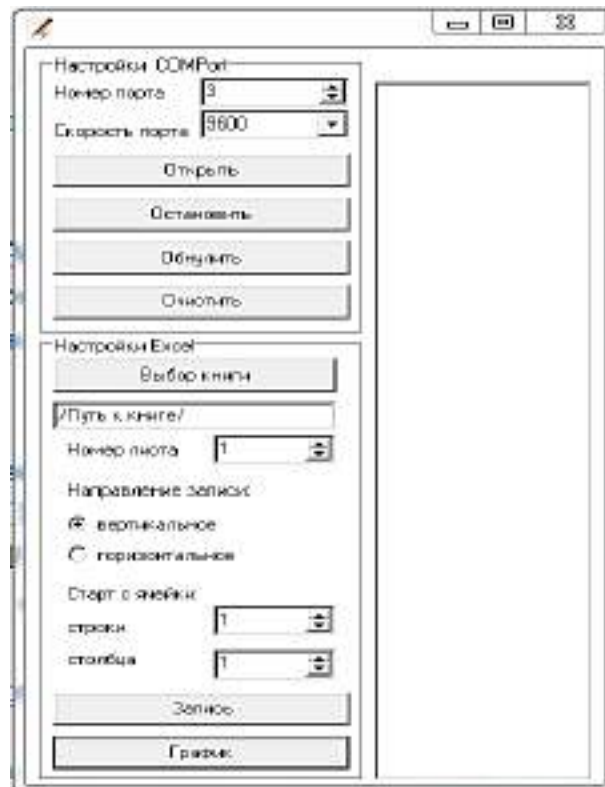


Рисунок 4.6 – Налаштування програми обміну інформації

Після налаштування «Налаштування Excel» натискаємо «Запис», після чого всі дані будуть записуватися в наш .xls файл.

Натиснувши на кнопку «Графік», з'явиться нове вікно з відображенням графіка залежності отриманих даних від часу (рисунок 4.7).

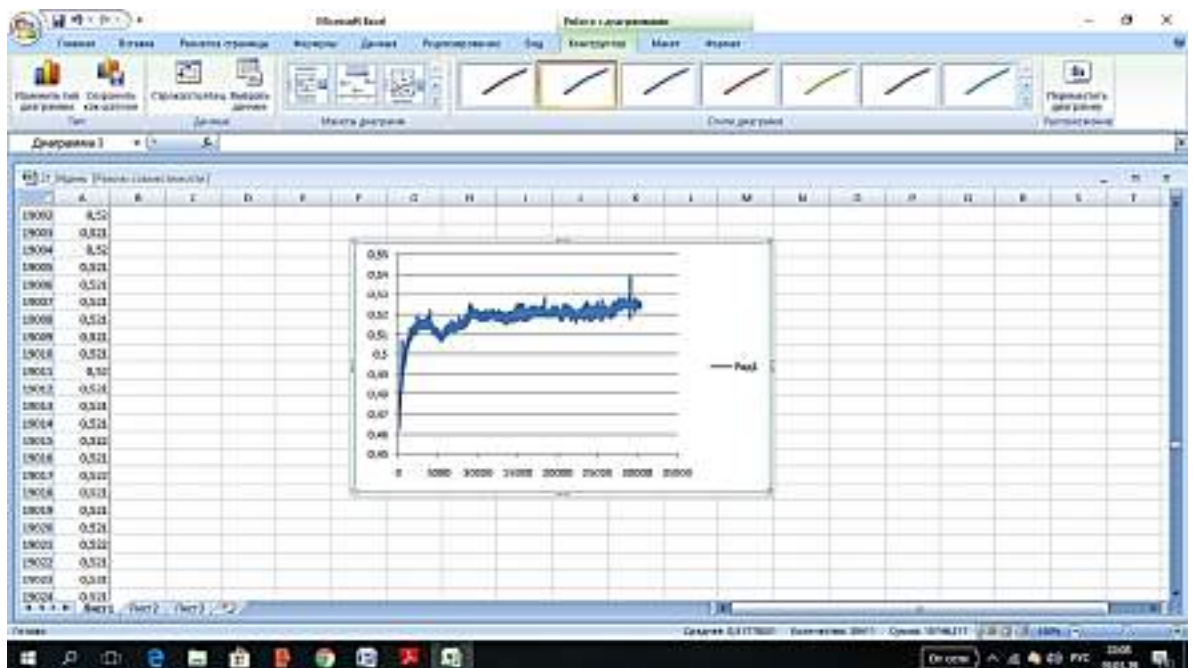


Рисунок 4.7 – Приклад електронної таблиці Excel та графіку

Вимірювання можуть проводитися з частотою до 800 SPS, а результати вимірювання з АЦП за послідовним інтерфейсом I²C надходять на мікропроцесорний блок попередньої обробки. Розроблений інтерфейс забезпечує передачу даних на РС та формування електронної *Excel* таблиці з результатами вимірювань, що забезпечує зручність накопичення та подальшої обробки отриманих даних.

За своїми технічними параметрами та можливостями представлений радіометричний комплекс може бути використаний для визначення кумулятивних функцій атмосферного ослаблення ММ радіохвиль з урахуванням мікрокліматичних особливостей території України, що є важливим для прогнозування параметрів готовності перспективних наземних та наземно-космічних ліній зв'язку ММ ДХ.

Відновлення значень повного вертикального ослаблення атмосферою проводиться на основі вимірних значень радіояркості температури неба в кожному окремому каналі. Для відновлення значень інтегральних волого- та водо-запасів атмосфери, а також значень ефективної температури хмарного шару використовуються дані синхронних 2-х частотних вимірювань про величини повного вертикального ослаблення. [100]

Величина повного вертикального атмосферного поглинання визначається на підставі вимірних значень антеної температури радіометрів з використанням наступного виразу

$$\alpha_{\text{total}}^{\lambda} = \frac{\ln \left[T_0 - (T_{\text{ant}} - T_{\text{bground}}) / (1 - \beta) \right] / (T_0 - T_c)}{\text{Sec} \vartheta}, \quad (4.1)$$

де T_{ant} – виміряна радіометром антена температура атмосфери;

β – коефіцієнт розсіювання поза основною пелюсткою діаграми спрямованості антени;

T_{bground} – ефективна температура фонового випромінювання, що приймається задніми та бічними пелюстками діаграми спрямованості антени (експериментально оцінені значення);

T_c – реліктове випромінювання космосу (2.73 K);

ϑ – zenітний кут зору;

λ – довжина хвилі (міліметри);

$T_0 = bT^0$ – усереднена температура атмосфери;

де T^0 – температура приземного шару повітря.

Для відновлення значень вмісту атмосферної водяної пари (Q) та рідко-крапельної вологи (W) було використано систему рівнянь для 3мм та 8мм діапазонів

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{oxygen}}(\lambda) + \Phi(\lambda)Q + k(\lambda, T_0)W \quad . \quad (4.2)$$

Використання представленої методики радіометричних вимірювань та обробки результатів дає можливість отримати експериментальні дані статистики мінливості атмосферного згасання та оцінок вмісту хмарної вологи для різних областей України.

Точність отримання величин вертикального атмосферного ослаблення хвиль міліметрового діапазону та знання параметрів їх просторових, часових та сезонних варіацій, а також погодної, частотної, територіальної, мікрокліматичної мінливості атмосферного ослаблення значною мірою визначають енергетичну та економічну ефективність розгортання перспективних наземних і мереж передачі мультимедійної інформації під час переходу від сантиметрового діапазону радіохвиль до міліметрового.

Вимірювальний комплекс забезпечує:

- вимірювання загального вмісту водяної пари в стовпі атмосфери (інтегральний вміст вологи) з оцінюваною похибкою методу менше 2 кг/м²;
- вимірювання інтегрального водозапасу хмар з оцінюваною похибкою методу менше 0,05 кг/м² (в інтервалі значень 0...1,5 кг/м²);
- вимірювання ефективної температури хмарного шару з темпом видачі даних близько 300 секунд у діапазоні реальних температур краплинної фракції та залежністю оцінюваної похибки від величини негативної температури переохолоджених крапель;

– ідентифікацію зон із кристалічною фракцією у хмарному шарі та можливістю морфологічних оцінок форми кристалів.

При цьому процедура вимірювання волого- та водозапасу атмосфери є основними, а процедури вимірювання ефективної температури хмарного шару та вимірювання поляризаційних відмінностей радіояркості кристалічних зон хмарності – допоміжними, що дозволяють підвищити інформативність основних каналів.

Встановлення таких комплексів на опорних аерологічних станціях системи гідромету України, з одного боку, дозволить забезпечити безперервність вимірювань, а з іншого – можливість додаткових калібрувань з використанням радіозондових даних. Застосування таких двох-або трьох-частотних вимірювальних систем ММ ДХ також є ефективним у наукових завданнях кліматології, у завданнях дослідження фізики хмар.

За своїми технічними параметрами та можливостями представлений радіометричний комплекс може бути використаний також для визначення кумулятивних функцій атмосферного ослаблення ММ радіохвиль з урахуванням мікрокліматичних особливостей території України, що є важливим для прогнозування параметрів готовності перспективних наземних та наземно-космічних ліній зв'язку ММ ДХ.

У загальному випадку, тривалість завмирань на похилій трасі є функцією частоти, кута місця і типу дощу або купчастої хмарності. При заданому порозі ослаблення сигналу тривалість завмирання буде збільшуватися зі збільшенням частоти і зменшенням кута місця.

Завдяки використаному методу зондування атмосфери було вперше отримано кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ ДХ за річний період та помісячно, що отримані з використанням розроблених засобів радіометрії, які забезпечують оцінку надійності високошвидкісних наземних та наземно-космічних каналів зв'язку в Україні.

На рисунку 4.4 наведена кумулятивна функція значень повного

вертикального ослаблення в атмосфері (в напрямку zenіту) отримана методом цілодобових радіометричних спостережень радіяркості власного радіотеплового випромінювання атмосфери на частоті 39 ГГц для найгіршого місяця (червень) в Харкові.

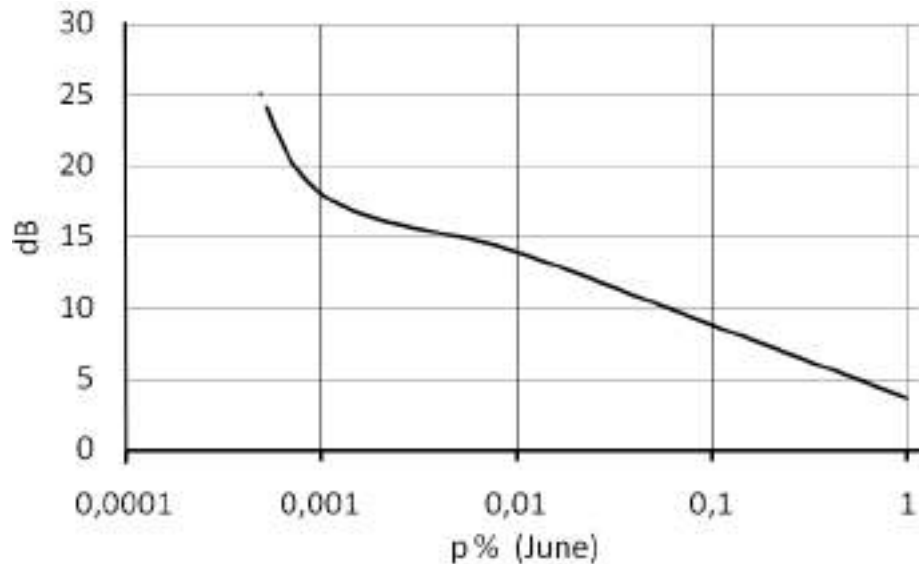


Рисунок 4.4 – Кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення в атмосфері для частоти 39 ГГц (червень, Харків)

Отримані експериментальним шляхом і представлені на рисунку 4.4 дані дають можливість провести оцінний перерахунок і для інших частот і кутів візування. При перерахунку експериментальних значень ослаблення з частоти 39 ГГц на інші частоти слід мати на увазі, що в більшості випадків спостерігається комбінований ефект різних механізмів ослаблення (головним чином за рахунок дощу і хмар) з відмінною, в загальному випадку, частотної залежністю для крапельної вологи хмар і дощу.

Отже, має сенс проводити такі частотні порівняння, обмежуючись лише одним з послаблюючих ефектів. Так, при використанні систем з низьким запасом на завмирання, загасання через хмари на частотах ММ ДХ також може бути значним.

Водозапас великих купчастих хмар в середніх широтах протягом року, за модельними оцінками ITU-R P.840-6 з ймовірністю 99,9 % не перевищує 2 кг/м^2 . Розрахунки показують, що, наприклад, на частотах близько 12 ГГц такий

водозапас викликає вертикальне загасання не більше 0.2 дБ. Однак, використовуючи дані роботи можна показати, що, наприклад, для температур хмарних крапель +100 °С для частот 19 ГГц, 39 ГГц і 94 ГГц значення ослаблення збільшаться в 2.5, 10 і 40 разів відповідно. У міру збільшення кута візування до 85 ° від зеніту, значення ослаблення на кожній частоті можуть збільшитися ще до 12 разів відповідно до величини $\text{Sec}\theta$.

Для аналогічних оцінок частотної і кутової залежності ослаблення сигналу в дощі для даного регіону можна використовувати пропонувані ІТУ-Р Р.837-7 моделі. Відповідно до них з імовірністю 99.99 % інтенсивність дощу в регіоні Харкова не повинна перевищувати 25 мм/год. Для такої інтенсивності дощу зростання вираженого в дБ ослаблення сигналу на частотах 19 ГГц, 39 ГГц і 94 ГГц порівняно з частотою 12 ГГц складе 2.6, 9.5 і 16 разів відповідно.

Близькість коефіцієнтів частотного перерахунку для хмарних крапель і крапель дощу, принаймні, в частотному діапазоні до 40 ГГц дозволяє розраховувати на адекватність проведення таких оцінок. У більш високочастотних діапазонах точність таких частотних перерахунків може знизитися багаторазово через труднощі поділу вкладів дощу і хмар в загальне ослаблення при істотному розходженні перерахункових коефіцієнтів для цих середовищ. У міру зміни кута візування, оцінювані значення ослаблення в дощі на кожній частоті можуть збільшитися, як і в разі хмар відповідно до величини близької $\text{Sec}\theta$.

Проведений вище аналіз отриманої в 8-ми ММ ДХ залежності і оціночних розрахунків показують, що в погодних умовах червня в зенітному напрямку для ймовірностей до 0.01 % повне вертикальне ослаблення в атмосфері не повинно перевищувати 15 дБ значення на частотах нижче 40 ГГц. Однак, при використанні кутів візування, віддалених від зеніту більш, ніж на 60 градусів перевищення цього умовно обраного порога буде швидко наростати в міру збільшення кута θ на похилих трасах і збільшення робочих частот. На відміну від червень-липневого періоду прогнозування, для однорічного періоду розгляду слід очікувати приблизно десятикратне поліпшення ситуації з

розглянутими можливостями перевищення дБ порогів, які вибирають для оцінок аутажа зв'язку.

На рисунку 4.5 наведені ймовірності перевищення значень інтенсивності дощу (які відкладені на осі абсцис), отримані на підставі метеорологічних спостережень з 5-хв інтервалом інтегрування в перебігу 4-х теплих місяців 2018.

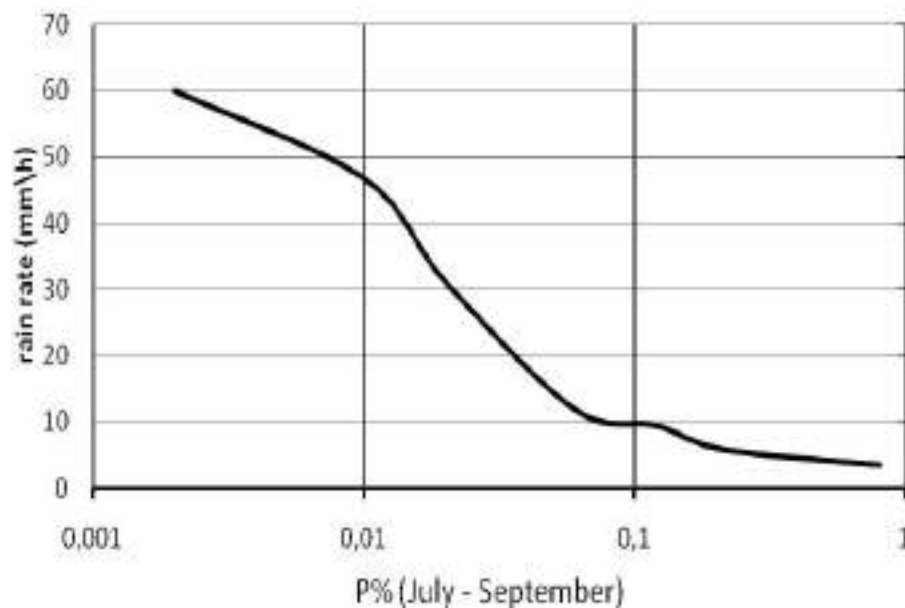


Рисунок 4.5 – Кумулятивний розподіл інтенсивності дощів за 4-х місячний період 2018 (червень-вересень) в м. Харків (Широта: 50° пн.ш. Довгота: 36° сх.д.), Україна.

Загальна кількість опадів за аналізований 4-х місячний період 2018 року становила 990 хв., - 240 хв. в червні, 415хв. в липні, 35 хв. в серпні і 300 хв. у вересні.

На основі цих метеорологічних даних проведені розрахунки атмосферного ослаблення за допомогою МРМ моделі для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц.

На рисунку 4.6 наведені розрахункові залежності кумулятивного розподілу погонного ослаблення атмосфери для частот 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц в липні 2018, а на рисунку 4.7 – для червня.

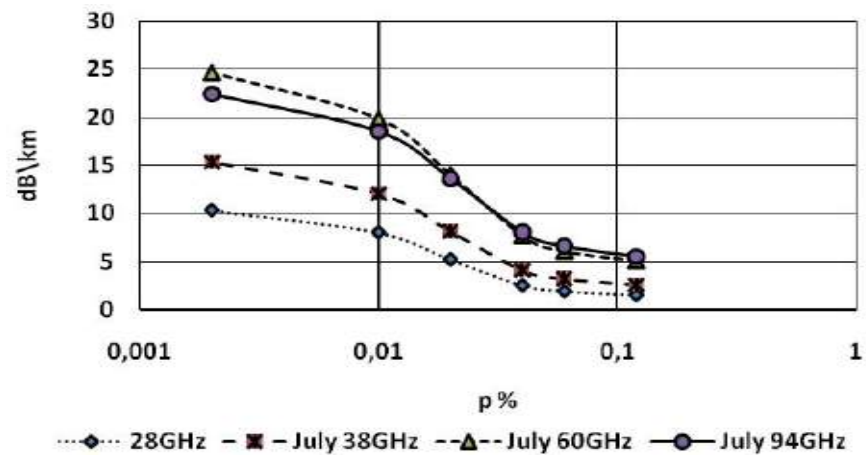


Рисунок 4.6 – Кумулятивний розподіл погонного ослаблення атмосфери в липні

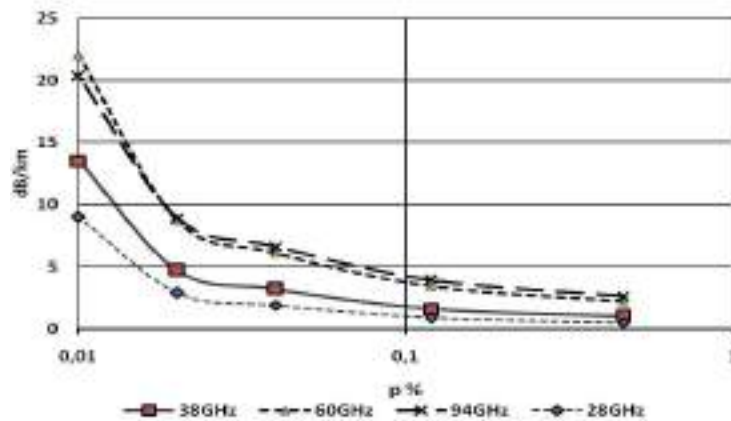


Рисунок 4.7 – Кумулятивний розподіл погонного ослаблення атмосфери в червні

Як для серпня, так і для вересня для $p = 0.01$ % ослаблення становить 1.4, 4.1, 7.7 і 8 дБ/км для 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц відповідно.

Отримані дані продемонстрували, що для $p = 0.01$ % за період 4-х теплих місяців ослаблення в зенітному напрямку не перевищує 9 дБ/км. Відповідно, для річного періоду спостережень слід очікувати ще більш низькі (в 2.5...3 рази) ймовірності екстремально підвищених значень погонного ослаблення. Однак якщо розглядати проблеми зі зв'язком в найгірші місяці (червень-липень), то для кожного з них окремо, ослаблення з вірогідністю 0.01 % на частотах 60 ГГц і 94 ГГц буде перевищувати відзначений вище поріг порушення зв'язку (15 дБ/км).

Питання тривалості подій опадів, що викликають перебої зв'язку та їх

міжрічної мінливості, а також питання адекватності ITU-R формул перекладу Т-хвилинних даних про інтенсивність дощу в 1-хвилинні в даному регіоні України заслуговують подальшого додаткового дослідження для високочастотних мереж тропосферного та супутникового зв'язку.

Середньорічна кількість опадів у Харкові становить 517 мм. Пік опадів спостерігається при грозах у червні та липні (по 61 мм кожна). Оподи зазвичай трапляються кілька разів у липні, але ці грози бувають дощовими і надзвичайно потужні. Ця обставина може бути найбільш руйнівним фактором, який порушує працездатність спроектованих тропосферних ліній та мереж зв'язку.

Найважливішим параметром, що визначає надійність лінії зв'язку, є параметр доступності (недоступності) лінії зв'язку, який кількісно характеризує ймовірність збою зв'язку.

Важливими є дані про кумулятивну функцію розподілу загасання атмосфери для кожної розглянутої області, крім уточнення визначених апаратних параметрів лінії зв'язку (чутливість приймача, випромінювана потужність передавача, посилення антени тощо) в ММ ДХ. для прогнозування значень коефіцієнта доступності. Дійсно, ослаблення, спричинене дощем, є основною причиною перебоїв у роботі тропосферних систем зв'язку, що використовують довжину хвиль СМ та ММ.

Сукупний розподіл питомого загасання в дощі (дБ/км) показує ймовірність перевищення того чи іншого значення атмосферного загасання. Визначити його за допомогою доступних радіофізичних моделей досить просто, якщо відомий статистичний розподіл інтенсивності дощу $p(R)$ (ймовірність p , для якої значення інтенсивності дощу більше R). Слід мати на увазі, що для цих цілей необхідно використовувати метеорологічні дані з коротким інтервалом усереднення. Зважаючи на важливість отримання найбільш адекватних оцінок для прогнозування надійності зв'язку, МСЕ рекомендує враховувати мікрокліматичні особливості регіонів, що розглядаються, шляхом експериментального накопичення сезонної та річної статистики загасання атмосфери з коротким інтервалом усереднення (близько 1

хвилина). Довготривалі цикли подібного роду експериментальних досліджень вже проведені або проводяться в ряді країн світу.

Такі експериментальні дані щодо кумулятивних функцій питомого горизонтального ослаблення атмосфери відсутні в СМ та ММ ДХ на території України. Також не існує метеорологічних даних, необхідних для адекватного обчислення статистики ослаблення радіохвиль, таких як часовий розподіл інтенсивності дощів з коротким часовим інтервалом усереднення.

Вихідні дані для побудови експериментально обґрунтованих функцій кумулятивного розподілу поверхневого специфічного загасання СМ та ММ ДХ можна отримати таким чином:

- експериментально, шляхом збору тривалої статистики безперервних змін горизонтального питомого загасання атмосфери на приземних шляхах "точка-точка";

- шляхом обчислення, на основі експериментальних даних про часовий розподіл дощу за допомогою радіофізичних моделей, адекватно пов'язуючи інтенсивність дощу з величиною питомого ослаблення в конкретному діапазоні довжин хвиль.

Незважаючи на те, що перший шлях вважається більш кращим з точки зору точності зроблених оцінок, його суттєвим недоліком є відносна складність підготовки та реалізації такої довгострокової програми безперервних радіофізичних спостережень «точка-точка».

До переваг другого підходу, який широко використовується у світі, є наявність довгострокових баз даних, що містять інтенсивність опадів у розгалуженій мережі метеостанцій, а також наявність радіофізичних моделей, які точно описують кількість ослаблення для різної інтенсивності дощу в різних діапазонах радіохвиль (зазвичай, від 5 % в області 10 ГГц до 30 % при частотах близько 1000 ГГц). До недоліків такого підходу можна віднести той факт, що в переважній більшості довгострокових баз даних інтенсивність дощу представлена із середнім часом (Т) від 20 до 60 хвилин. У той же час значно коротші періоди усереднення інтенсивності дощу були визнані найбільш

підходящими для розрахунку ослаблення на шосе.

На рисунку 4.8 показано ймовірність перевищення значень інтенсивності дощу (які побудовані на осі абсцис), отриманих нами на основі метеорологічних спостережень (з 5-хвилинним інтервалом інтеграції) протягом 4 теплих місяців 2018 та 2019 років, а також дані ІТУ для міста Харкова та Львова.

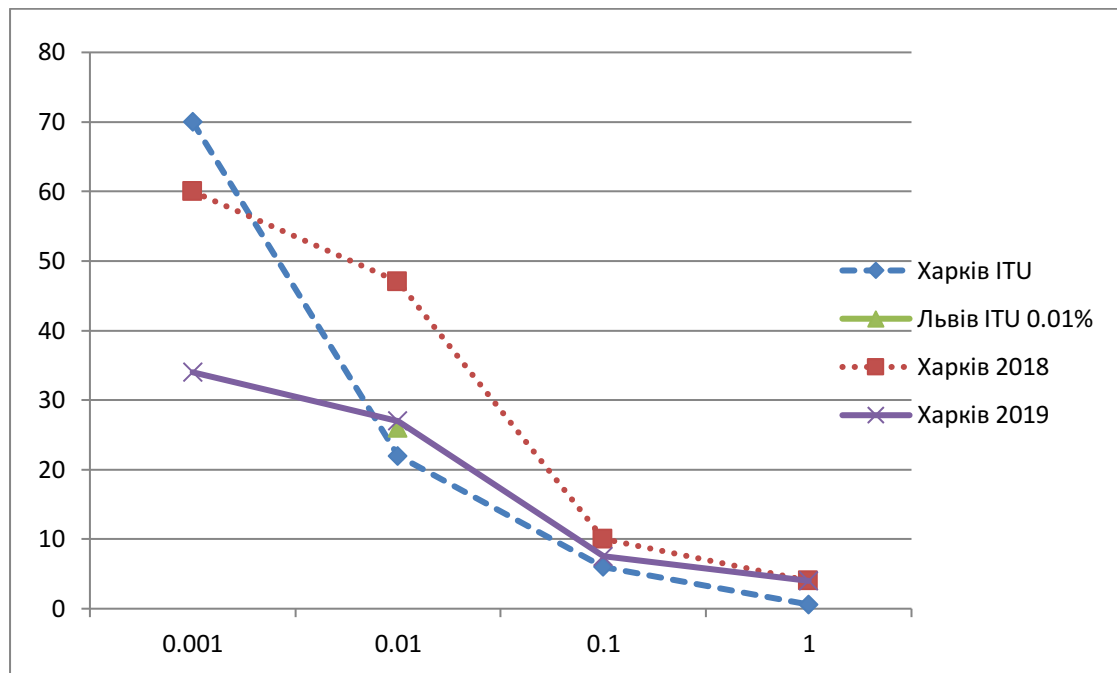
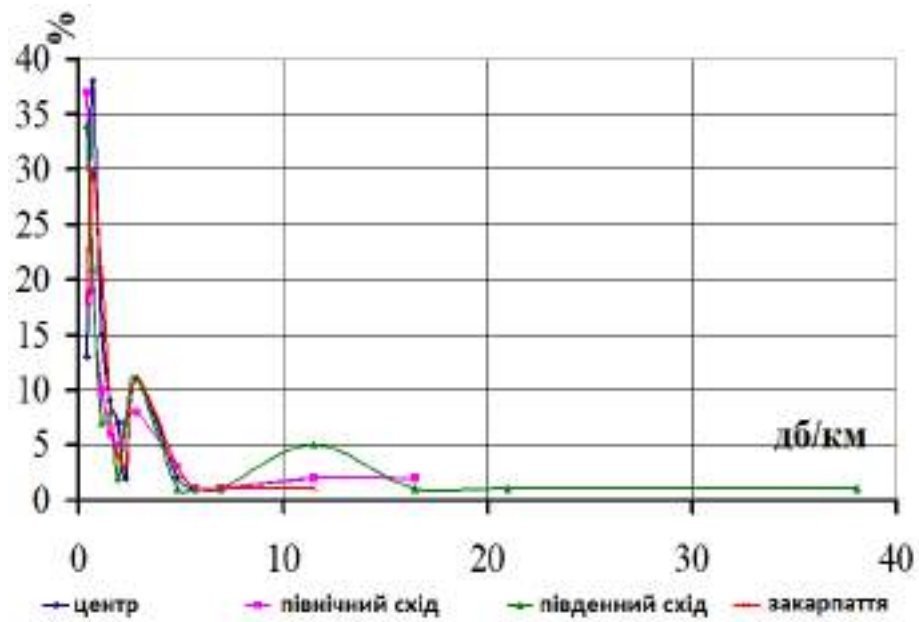
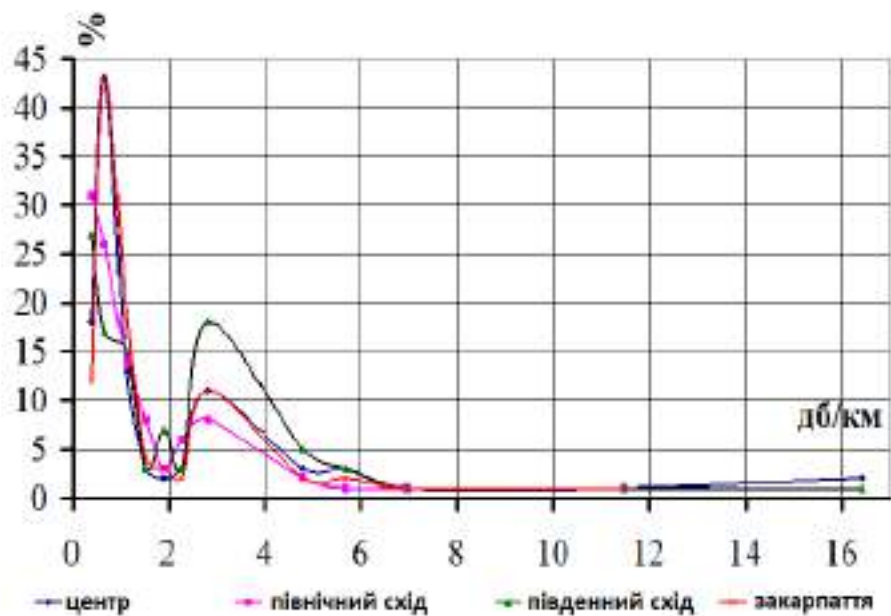


Рисунок 4.8 – Кумулятивний розподіл інтенсивності дощу за 4-місячний період (червень-вересень) 2018 та 2019 Харків (Широта: 50° пн.ш. Довгота: 36° сх.д.), Україна.

ІТУ дає мінімальну ймовірність протягом року 0.01 % – 35мм/год, за отриманими нами даними з рисунка 4.8 для 0.01 % – 47мм/год і 27 мм/ч (вісімнадцятого та дев'ятнадцятого років) за 4 гірші місяці. На рисунках 4.9 а та 4.9 б приведені гістограми розподілу ймовірності (% від часу подій дощу) для значень погонного ослаблення в дощах на частоті 94 ГГц у липні(а) та серпні (б)



а)

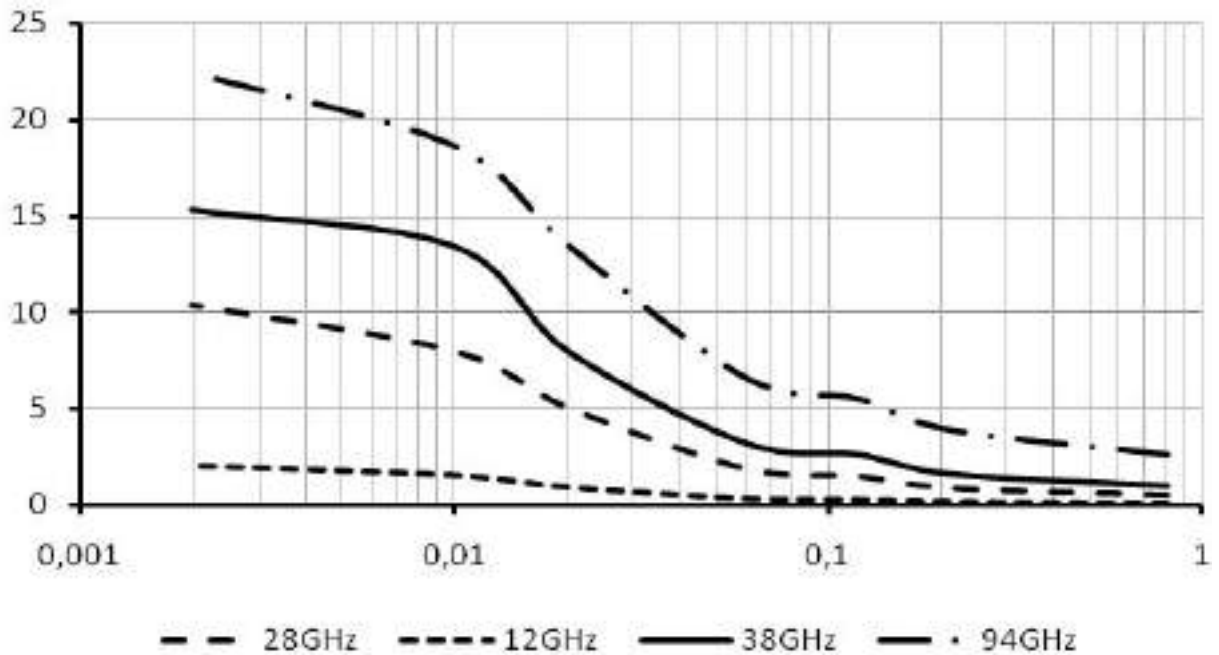


б)

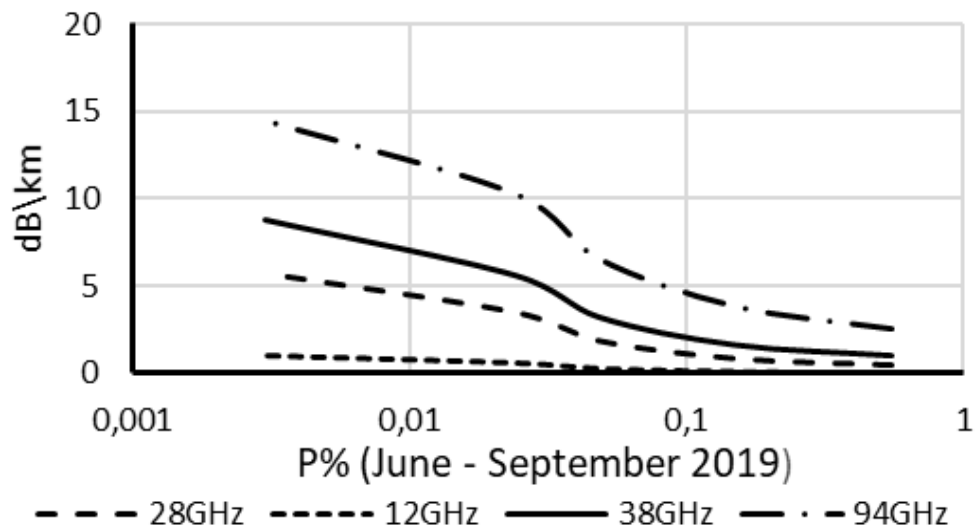
Рисунок 4.9 – Гістограми розподілу ймовірності (% від часу подій дощу) для значень погонного ослаблення в дощах на частоті 94 ГГц у липні(а) та серпні (б) для різних регіонів України

На горизонтальних трасах накопичення даних може бути отримано на основі приймальної і передавальної апаратури, встановленої на приземних трасах, в сукупності з допоміжною метеорологічною апаратурою з хвилинним інтервалом вимірювань [101].

На рисунку 4.10 наведені розраховані в даній роботі залежності кумулятивного розподілу ймовірностей питомого ослаблення атмосфери для різних частот за 4-місячний період 2018 та 2019 (червень-вересень)



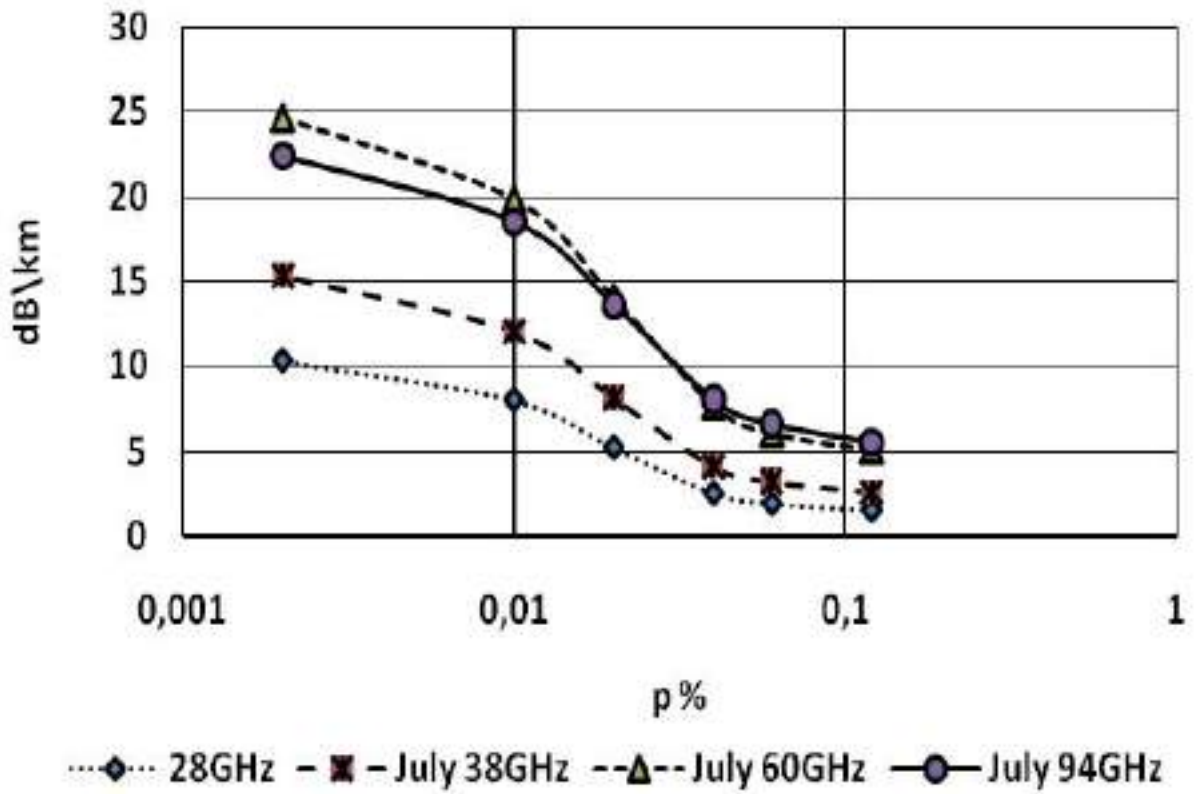
а) 2018



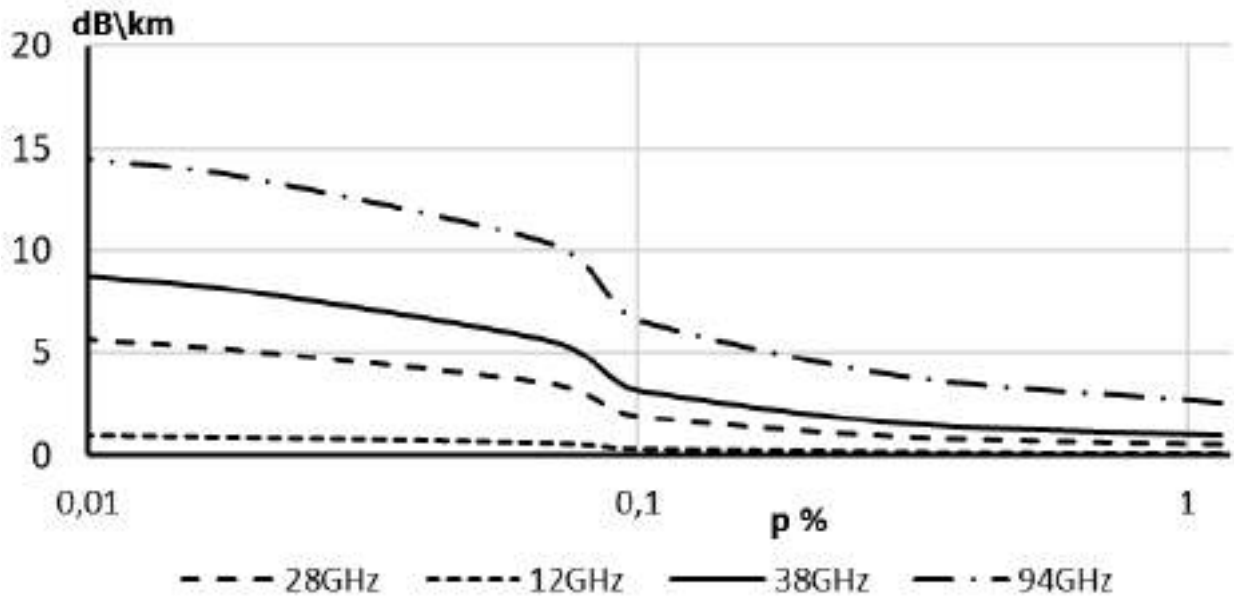
б) 2019

Рисунок 4.10 – Сукупний розподіл питомого загасання атмосфери за 4-місячний період 2018 та 2019 (червень-вересень)

На рисунку 4.11 наведені розраховані залежності кумулятивного розподілу ймовірності питомого загасання атмосфери для різних частот у липні 2018 року та липні 2019 року, а на рисунку 4.12 – у червні.

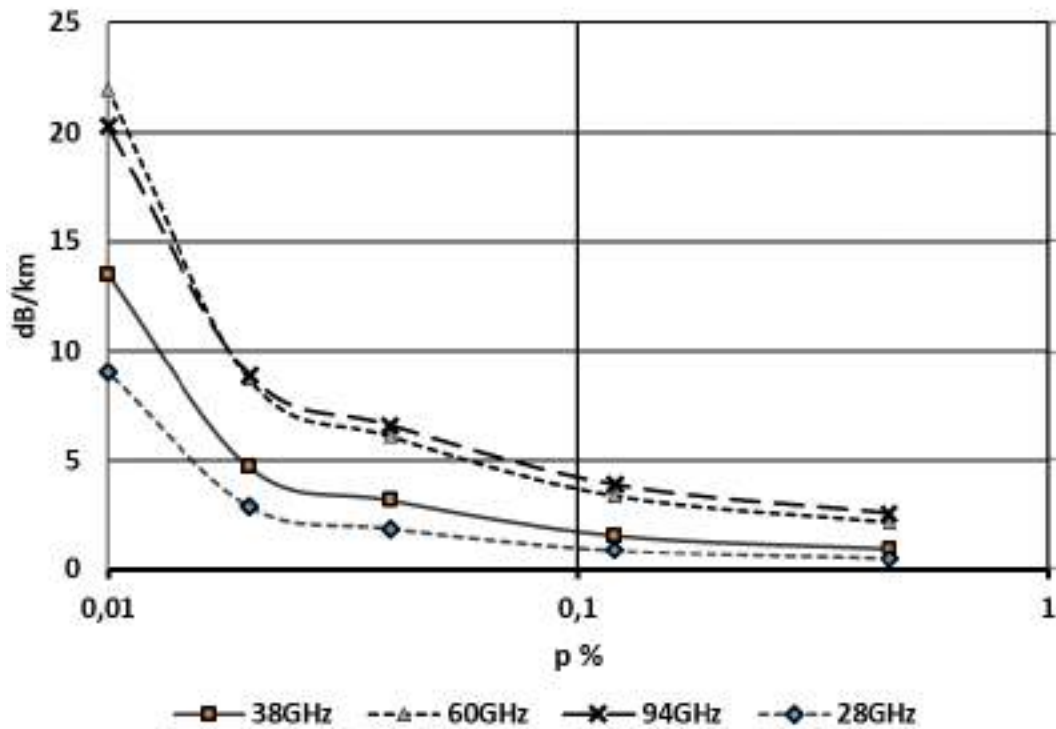


a) 2018

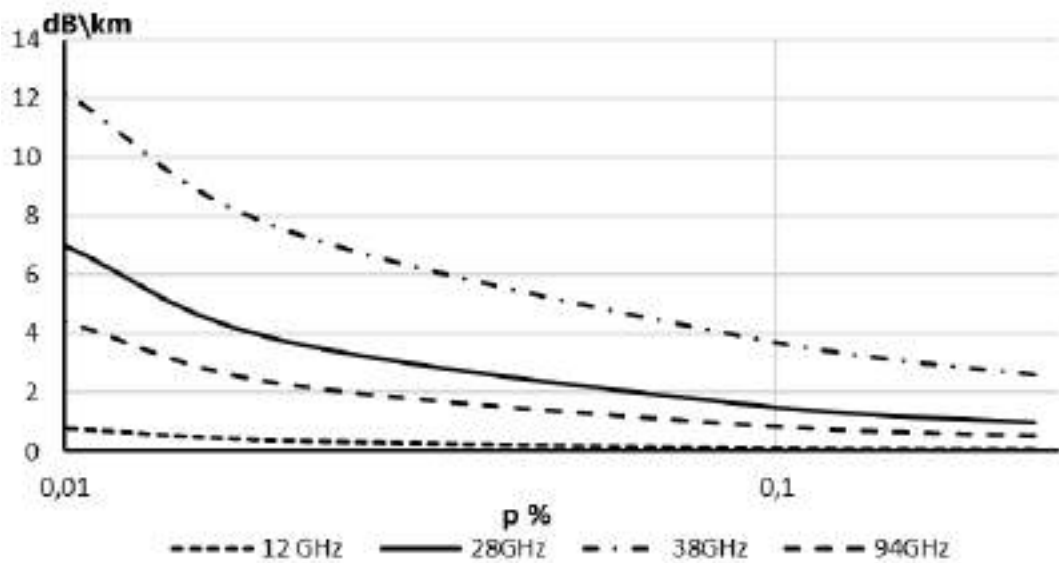


б) 2019

Рисунок 4.11 – Кумулятивний розподіл питомого загасання атмосфери (липень)



a) 2018



б) 2019

Рисунок 4.12 – Кумулятивний розподіл питомого загасання атмосфери (червень)

Наведені на рисунках дані дозволяють кількісно оцінити ймовірність перевищення значень питомого атмосферного ослаблення за вказаний 4-місячний період та щомісяця. Аналіз результатів дозволяє відзначити, що найбільш несприятливим місяцем у році для заявок на зв'язок є липень. При

цьому відмінності помітні за ці два роки у червні та липні. Вони характеризуються меншою кількістю опадів у 2019 році, ніж у 2018 році у ці місяці. Відмінності були ще помітнішими протягом наступних двох місяців. Так, якщо у серпні та вересні 2018 року значення питомого загасання є аналогічними та значно меншими, ніж у червні чи липні, то у серпні 2019 року не було сильних опадів понад 4 мм/год (загасання менше 3 дБ/км з $p = 0,01$ % на всі розглянуті частоти), а у вересні опади та ослаблення були на рівні червня цього року.

Для обох років було характерно, що значення загасання атмосфери для $p = 0,01$ % були меншими ніж 15 дБ/км для всіх частот, що не перевищували 38 ГГц, і для будь-яких періодів врахування. Тобто, якщо порогове значення відключення зв'язку 15 дБ/км, то принаймні на 2018 та 2019 роки зв'язок можна вважати надійним (з вірогідністю відключення менше 0,01 %) на всіх частотах, нижчих від 40 ГГц. Відповідно, слід очікувати навіть нижчих ймовірностей надзвичайно високих значень специфічного ослаблення протягом року спостереження. Беручи до уваги проблеми зв'язку в найгірші місяці (червень та липень), то для кожного з них окремо ослаблення на 60 ГГц та 94 ГГц з ймовірністю 0,01 % перевищить зазначене вище (15 дБ/км) поріг збою зв'язку. Спостережуване несподіване перевищення загасання на частоті 60 ГГц порівняно з 94 ГГц, мабуть, пов'язане з резонансними ефектами для дощів високої інтенсивності, які спричинені співмірністю розміру крапель з довжиною хвилі 5 мм.

Питання тривалості подій опадів, що спричиняють перебої в комунікаціях, та їх міжрічна мінливість, а також питання достатності МСЕ та інших формул для перетворення даних Т-хвилин на 1-хвилинні дані про швидкість дощу у розглянутий регіон України заслуговує на додаткові дослідження для високочастотних мереж зв'язку тропосфери.

4.3 Розробка багатопроменевої моделі поширення радіохвиль ММ ДХ для закритого простору

Широке впровадження технологій високоякісного відтворення відеоінформації з високою роздільною здатністю (HDTV, UHD) призвело до появи технологій WiGig і технологій стандарту бездротової передачі інформації IEEE 802.11ad в 2012 р було продиктовано необхідністю значного підвищення швидкості передачі мультимедійної інформації. Використання діапазону 60 ГГц дозволяло значно розширити смугу пропускання каналу зв'язку до 2 ГГц. Високі швидкості передачі інформації за технологією WiGig досягалися всередині приміщень на невеликих відстанях (не більше 10...15 м), що було достатньо, наприклад, для технологій віртуальної або доповненої реальності (VR/AR).

Останнім часом кілька міжнародних груп зробили зусилля зі стандартизації бездротових персональних мереж (WPAN), включаючи технології IEEE 802.11ad, IEEE 802.15.3c, WirelessHD, WiGig та ECMA-387. Ці системи визначають швидкість передачі адаптивного фізичного (PHY) рівня до 7 Гбіт/с в діапазоні 57,24-65,88 ГГц.

Багато компаній Qualcomm, Intel, Broadcom, Tensorcom та ін. розробили економічні комплекти електронних компонентів для побудови радіомодулів, які можуть використовуватися в мобільних системах зв'язку всередині приміщень (indoor). Структура і параметри таких модулів відрізняються один від одного і при впровадженні необхідно мати параметри реальної роботи пристроїв у різних умовах оточення.

Під час проведення експерименту використовувалися точки доступу MikroTik Wireless Wire, які підтримує стандарт 802.11ad. і використовує високочастотний діапазон радіохвиль. Якщо стандарти 802.11n і 802.11ac працюють на частотах 5 ГГц, то ad – 60 ГГц. Це означає, що технологія здатна обробляти набагато більше даних, ніж попередні стандарти, а також набагато більш меншого радіуса дії, так як більш високочастотні сигнали розсіюються

набагато сильніше.

Це означає що 802. 11 ad дає можливість надзвичайно високих бездротових швидкостей на короткі відстані. Швидше за все це буде в більшій мірі бездротова магістральна технологія, яка замінює кабельний зв'язок, завдяки своїй дуже високій потенційній пропускній здатності. Вона буде використовуватися в якості основного з'єднання, щоб все робилось набагато швидше, коли у вас є пристрої, до яких ви не можете підвести кабель.

Технології 802. 11 ad, можуть забезпечити «третій шар» спектра для особливо складних умов. Це може бути особливо важливо для галузей з дуже високими вимогами до пропускної здатності.

Пристрій MikroTik має в доступі 3 канали: 58.32, 60.48 і 62.64 ГГц. Кожен канал має ширину в 2.16 ГГц. На практиці цих трьох каналів більш ніж достатньо для коректної роботи пристрою з стандартами-те 802. 11 ad. В якості антени використовуються фазована решітка з кутом охоплення 60 градусів.

Антенна була виготовлена компанією (SEMCO) і зображена на рисунку 4.13 Антена SEMCO містить тільки антенні елементи з горизонтальною поляризацією які забезпечували дуже високий коефіцієнт посилення за рахунок більш крутого відсікання під великими кутами. Завдяки цьому топологія SEMCO призначалась для використання в масиві, де множинні резервні антенні решітки були спрямовані під різними кутами. На рисунку 4.14 зображен радіомодем MikroTik. З деякими втратами по потужності AP визначить, який антенний модуль оптимально спрямований для конкретного користувача, що дозволяє антені використовувати високу спрямованість і зменшувати витрати на охоплення кожного індивідуального пристрою в зоні дії мережі. На етапі тестування підтримуються тільки базовий діапазон частоти, тому тестування уздовж сильної зони покриття було виділено для цієї особливої топології. Було кілька версій пристроїв міліметрового діапазону, які підтримували 250 мВт, 500 мВт і 1 Вт активного споживання енергії з різною кількістю активної елементів. Фазована матриця мала 32 антенних елемента і при максимальній потужності передачі може активувати до 16 паралельних кіл. Через більш високу споживну

потужності та високе спрямоване посилення, цей стиль антени називається антеною типу AP.

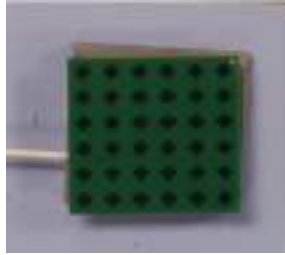


Рисунок 4.13 – Антенна решітка (SEMCO)



Рисунок 4.14 – Радіомодем MikroTik

В основі Wireless Wire 60G лежить потужний 4-ядерний процесор Qualcomm IPQ-4019. Цей пристрій забезпечує високошвидкісне з'єднання до 200 метрів. Так як радіохвилі міліметрового діапазону мають велику сприйнятливості до загасання в просторі, з цієї причини виробник рекомендує використовувати пристрій на відстані, що не перевищує 100 м. Робоча температура навколишнього середовища від -40 до +70 °С. Живлення на вході 12...57 В. Максимальне енергоспоживання 5 Вт.

Максимальна швидкість яку можна отримати за допомогою даного пристрою досягає позначки в 1 Гбіт рисунок 4.15, в повно дуплексному режимі. Можна отримати одночасно по 950 Мбіт на прийом і передачу, сумарно 1900

Мбіт, що можна порівняти з використанням оптоволокна або крученої пари.

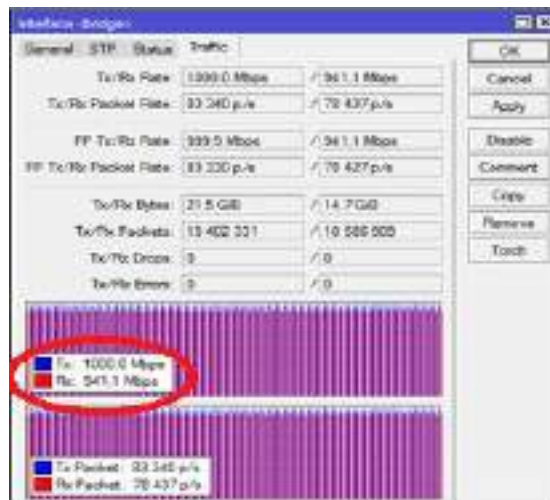


Рисунок 4.15 – Гігабітний трафік

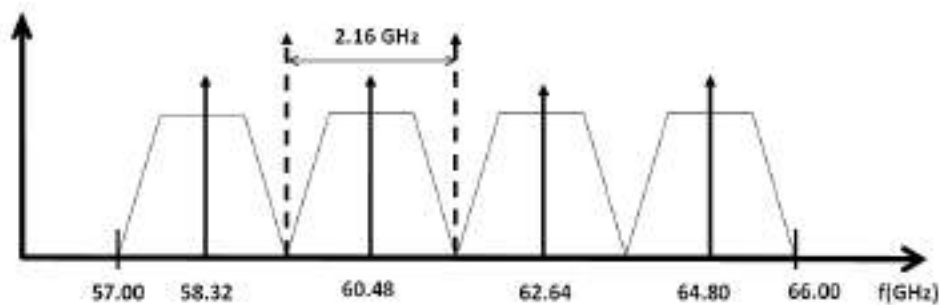
В "802.11ad" визначено два методи модуляції: SC – SingleCarrier, і OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OFDM використовується для зв'язку на великих відстанях та відповідно при великих затримках при поширенні сигналу, як не дивно, але саме при таких умовах OFDM проявляє себе найкращим чином. OFDM реалізується спільно з SQPSK, QPSK, 16-QAM і 64-QAM модуляцією, при цьому максимальна швидкість передачі даних на фізичному рівні (PHY) становить 6,756 Гбіт/с.

SC модуляція розрахована на роботу з пристроями, що мають невеликий форм-фактор і порівняно низький рівень споживання енергії. До такого типу пристроїв відносяться, наприклад, звичайні стільникові телефони і планшети. SC використовує $p / 2$ -B / SK, $p / 2$ -QPSK, and $p / 2$ -16-QAM модуляцію. Незважаючи на це максимальна швидкість передачі даних до 4,620 Гбіт/с на фізичному рівні. У цьому стандарті використовується LDPC кодер зі швидкістю кодування $1/2$, $5/8$, $3/4$ і $13/16$.

Гігабітні швидкості передачі даних на фізичному рівні в стандарті 802.11ad досягаються завдяки використанню дуже широкого спектра (близько 2-х ГГц) з простими схемами модуляції, такими як BPSK і QPSK. У той час як в стандарті 802.11ac використовуються технології модуляції з куди більшим

ущільненням біт на символ (256-QAM), а також використовується до восьми потоків одночасно переданих даних. Частотний план розбиття діапазону 60 ГГц на канали показано на рисунку 4.16.



Рисунк 4.16 – Частотний план розбиття діапазону 60 ГГц на канали

Європейський регулятор (CEPT) рекомендує використання діапазону 60 ГГц:

- 59...66 GHz – для мобільних сервісів;
- 59...62 GHz – для локальних радіомереж;
- 62...64 GHz – для мобільних широкосмугових систем та систем транспортної інформатики;
- 58...59 GHz – для радіосистем астрономічних обсерваторій.

Одним із параметрів наведеним у таблиці 4.1 вказана еквівалентна ізотропна потужність в антені EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power), яка є інтегральною енергетичною характеристикою передавача, що враховує спрямовані властивості антени.

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX} \quad [dBm], \quad (4.3)$$

де P_{TX} – потужність передавача, dBm ;

G_{TX} – коефіцієнт посилення передавальної антени dBi .

У діапазоні 60 ГГц для реалізації радіоприймачів застосовується три основні архітектури, супергетеродинна (super-heterodyne), прямого перетворення (direct-conversion), гібридна схема (low-IF architecture). На рисунку 4.17 показана гібридна схема радіоприймача

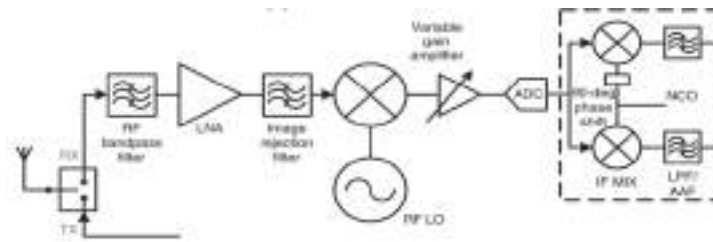


Рисунок 4.17 – Гібридна схема радіоприймача

Архітектура з низькою проміжною частотою ПЧ (low-IF) називається «цифровий ПЧ» (digital IF), оскільки перетворені зі зниженням частоти сигнали ПЧ (IF) піддаються цифровій обробці після аналого-цифрового перетворення (ADC).

Сигнали ПЧ (low-IF) не перетворюються безпосередньо в смугу модулюючих сигналів, а переміщуються в смугу низької ПЧ, де частота дискретизації аналого-цифрового перетворювача (ADC) може підтримувати перетворення цифрові сигнали за допомогою АЦП і квадратурної демодуляції I/Q. Далі обробка виконується у цифровій області.

В роботі експериментальні дослідження проведено на комплекті точок доступу фірми Mikrotik Wireless Wire RBwAPG-60ad, зовнішній вигляд яких представлений на рисунку 4.18



Рисунок 4.18 – Загальний вигляд радіомодемів AP фірми Mikrotik RBwAPG-60ad

Модеми мають 4 ядерні процесори з архітектурою ARM IPQ-4019 (частота 716 МГц). Є і необхідний для підключення Ethernet-порт на 1 Гбіт з

допомогою пасивного живлення за допомогою PoE. Управління та контроль відбувається під керуванням операційної системи RouterOS Level 3 [102].

Модеми Mikrotik RBwAPG-60ad (рисунок 4.19) базуються на інтегрованій платформі фірми Qualcomm Technologies: базового цифрового модуля BM (Baseband Module) Qualcomm QCA6335, радіочастотного модуля (RF front-end) QCA6310 PM (Phased array Module) $\times 6$.

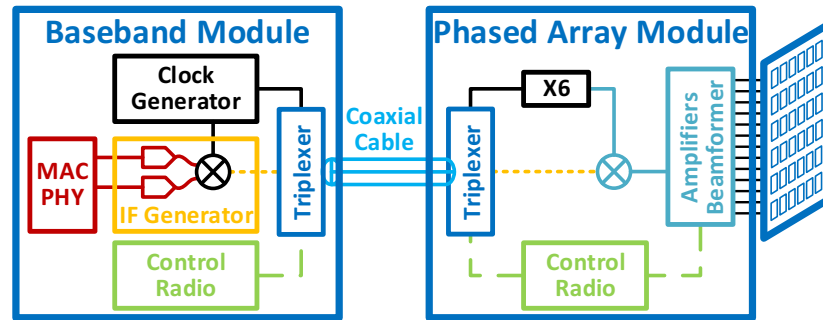


Рисунок 4.19 – Узагальнена архітектура радіомодемів фірми Mikrotik RBwAPG-60ad

Особливістю архітектури радіомодемів є те, що вона реалізує гібридну (аналого-цифрову) схему обробки сигналів, а зв'язок між окремими модулями реалізується за допомогою короткого коаксіального кабелю, яким передаються чотири типи сигналів: радіочастотні сигнали проміжної частоти (IF data signal), частота опорного сигналу (Reference Clock), контрольний сигнал (Control Signal) та напруга джерела живлення DC.

На рисунку 4.20 представлені структура та спектри сигналів, що проходять між BM та PM: сигнал джерела живлення DC; опорний сигнал проміжної частоти IF у районі 7,5 ГГц [103]; контрольний сигнал у районі 118 МГц та сигнал проміжної частоти у районі 15 ГГц.

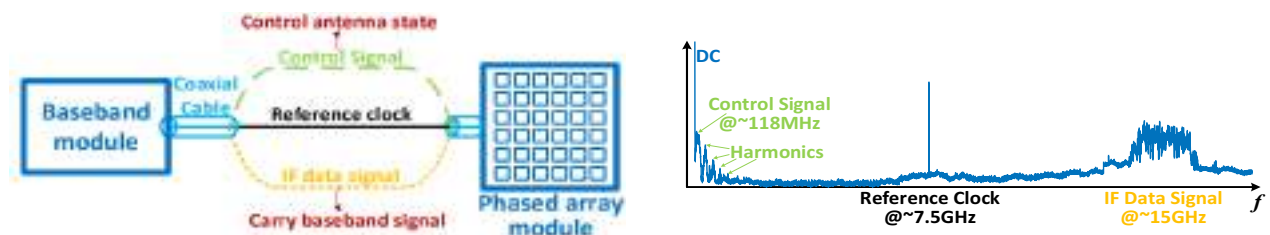


Рисунок 4.20 – Структура та спектри сигналів кабельного каналу міжмодульного зв'язку радіо модемів

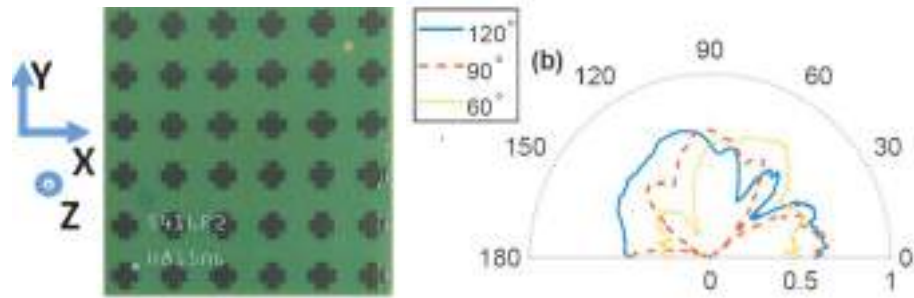


Рисунок 4.22 – Узагальнена структура модему та формат команди управління (Control FPGA)

Для визначення теоретичної пропускної спроможності міліметрового каналу зв'язку, необхідно провести оцінку бюджету радіолінії завдовжки, що враховує потужність передавача, ослаблення сигналу 60 ГГц на трасі та посилення приймальної антени. G_{RX} . Граничну пропускну спроможність каналу зв'язку в залежності від відстані d_{TX-RX} між передавачем і приймачем, смуги пропускання та співвідношення сигнал/шум, можна оцінити виходячи з формули К.Шеннона

$$C(d) = BW_{60GHz} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_W^{RX}(d)}{N_W} \right) \quad [\text{бит/сек}], \quad (4.4)$$

де $BW = 2.16 \cdot 10^9$ Гц – ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц;

$P_W^{RX}(d) = 10^{(P_{dB}^{RX}(d)/10)}$ – потужність сигналу на вході приймача в Вт на відстані d від передавача;

$N_W = 10^{(N_{dB}/10)}$ – потужність шуму в Вт.

Потужність шуму залежить від різних факторів: діапазону частот, смуги пропускання каналу радіозв'язку та шумів реалізації конкретної системи зв'язку стандарту *IEEE 802.11ad*

$$N_{dB} = k_B T_c + 10 \log_{10}(BW_{60GHz}) + L_I + n_F \quad [\text{дБ}], \quad (4.5)$$

де: $(k_B T_c = -174 \text{ дБ/Гц})$ – спектральна щільність потужності шуму;

BW – ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц;

$(L_I = 10 \text{ дБ})$ – згасання під час реалізації апаратури стандарту *IEEE 802.11ad*;

n_F – коефіцієнт шуму апаратури стандарту *IEEE 802.11ad* ($n_F = 5$ дБ).

Рівень сигналу в приймачі P_{RX} можна представити у вигляді

$$P_{dB}^{RX}(d) = P_{TX} + G_{TX} - PL(d) + G_{RX} \quad [dB]. \quad (4.6)$$

У разі різного оточення всередині приміщень (Indoor) можна використовувати для розрахунку ослаблення сигналу 60 ГГц $PL(d)$ дві основні моделі: модель прямої видимості (LOS) та модель непрямой видимості (NLOS):

$$PL(d)_{LOS} = A_{LOS} + 10n \log_{10}(d/d_0)|_{d_0=1} + X_{\Omega}, \quad d \geq d_0 \quad [dB], \quad (4.7)$$

$$PL(d)_{NLOS} = A_{NLOS} + 10n \log_{10}(d/d_0)|_{d_0=1} + X_{\Omega}, \quad d \geq d_0 \quad [dB], \quad (4.8)$$

де f – частота сигналу в ГГц;

n – коефіцієнт, що залежить від умов поширення сигналу (2...6);

d – відстань між передавальною та приймальною антенами, м;

d_0 – еталонна відстань, $d_0 = 1$ м;

X_{Ω} – випадкова величина, що описує великомасштабні завмирання, що залежать від середніх втрат на трасі (*shadowing effects*).

У таблиці 4.2 представлені величини коефіцієнта для різних умов поширення

Таблиця 4.2 – Величини коефіцієнта для різних умов поширення

Умови поширення	$A = PL(d_0), [dB]$	n	$X_{\Omega}, [dB]$
Усередині будівель LOS	34-84	0,5-2,5	0,14-5,4
Усередині будівель NLOS	35-86	1,64-5,4	1,55-8,6

Для оцінки реальної пропускної спроможності каналу зв'язку на основі існуючих систем необхідно звернутися до стандарту IEEE 802.11ad, де вказані модуляційні схеми MCSi (Modulation and Coding Scheme) для режиму роботи точок доступу AP Mikrotik RBwAPG-60ad з використанням однієї несучої SC (Single carrier) та наведені величини чутливості приймача P_{RX}^{MCSi} та максимальна досяжна при цьому швидкість передачі інформації DR (Data rate).

Результати моделювання каналу зв'язку серед Matlab представлені на рисунках 4.23 та 4.24 і показують залежності швидкості передачі інформації від

довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad на частоті 60,48 ГГц в режимі точка-точка (Indoor LOS) і в режимі точка-точка (Indoor NLOS). Програма моделювання систем зв'язку міліметрового діапазону в програмному забезпеченні MathLab представлені в додатках.

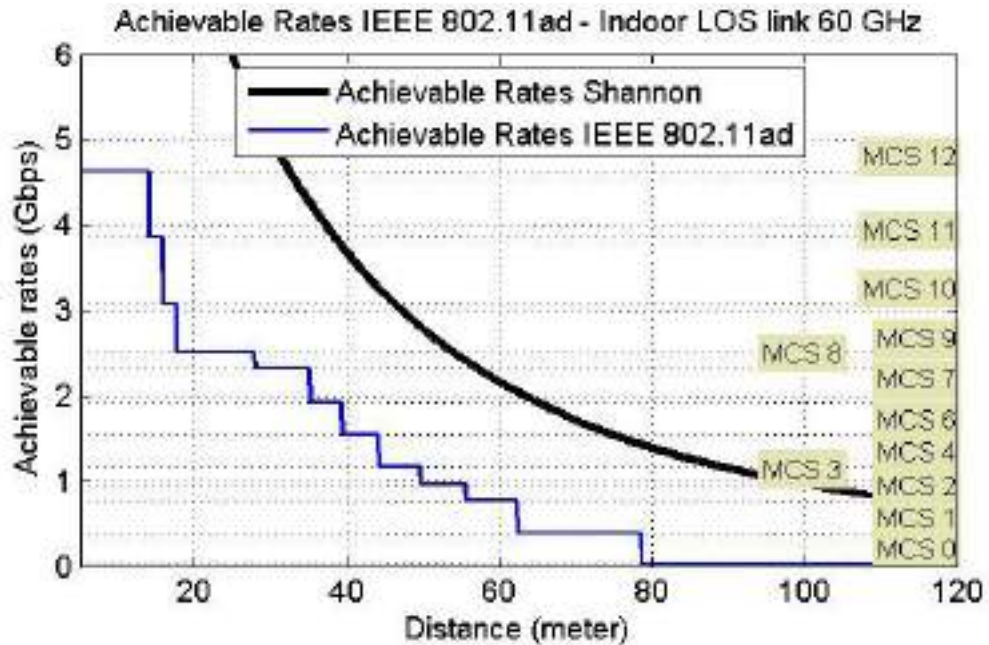


Рисунок 4.23 – Залежність швидкості передачі C від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц як точка-точка (Indoor LOS)

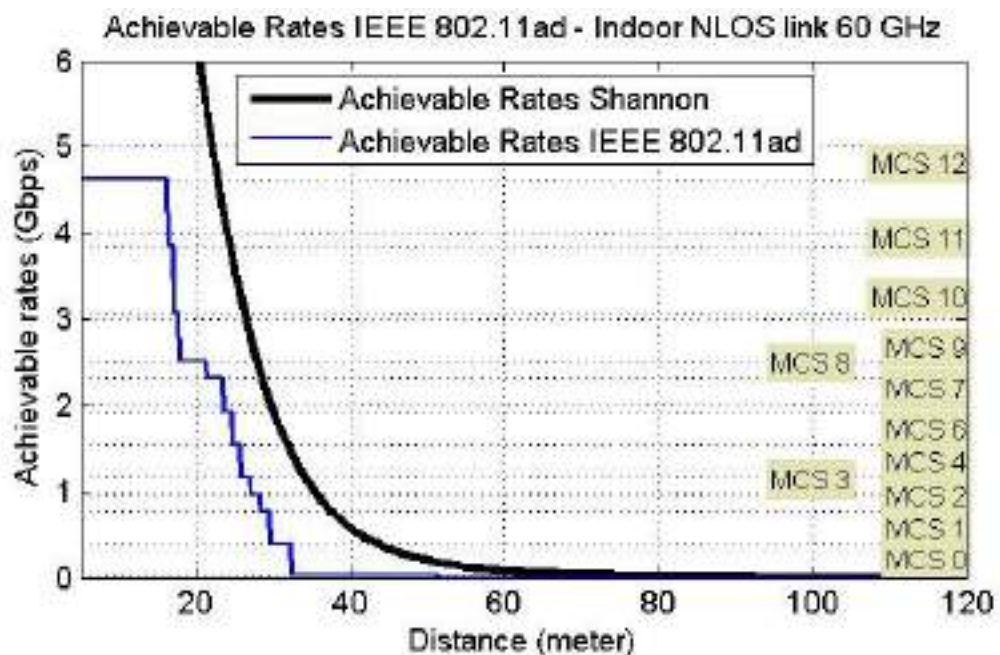


Рисунок 4.24 – Залежність швидкості передачі C від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц як точка-точка (Indoor NLOS)

Якщо в якості максимальної граничної швидкості передачі інформації по каналу зв'язку взяти 1 Гбіт/сек системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц, то можна визначити максимальний радіус зони обслуговування для AP в приміщенні. Радіус дії для режиму (Indoor LOS) – 60 м; а для режиму (Indoor NLOS) – 30 м.

Експериментальні дослідження радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad проводились у навчальному класі із загальними розмірами: довжина – 25 м; ширина – 6 м; висота – 5 м. Загальний вигляд класу та план приміщення представлені на рисунках 4.25.- 4.26.



Рисунок 4.25 – Загальний вид навчального класу під час проведення випробувань радіомодемів AP

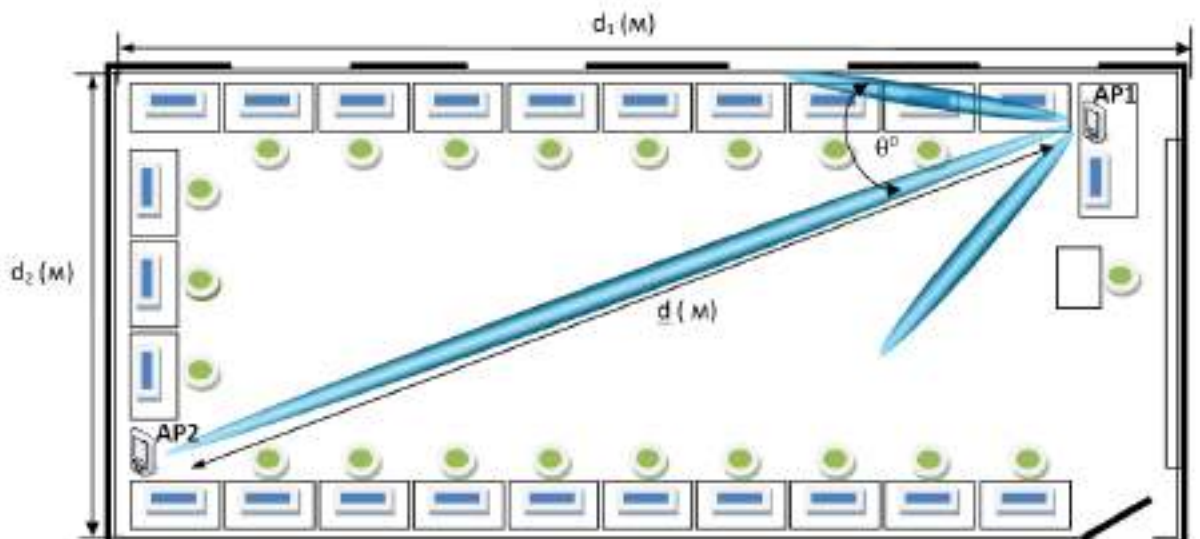


Рисунок 4.26 – Загальний план навчального класу під час проведення випробувань радіомодемів AP

Генератор трафіку – одна з найважливіших утиліт визначення характеристик якості каналу, вбудована в RouterOS. Цей інструмент дозволяє проводити тестування продуктивності без витрат на дороге обладнання. Трафік генерується одним пристроєм у мережі. Ви генеруєте та відправляєте RAW-пакети по конкретних портах, він буде збирати значення затримки (latency) та пульсацій (jitter), швидкості tx/rx, підраховувати втрачені пакети та виявляти пакети Out-of-Order. На рисунку 4.27 представлена схема тестування лінії зв'язку.

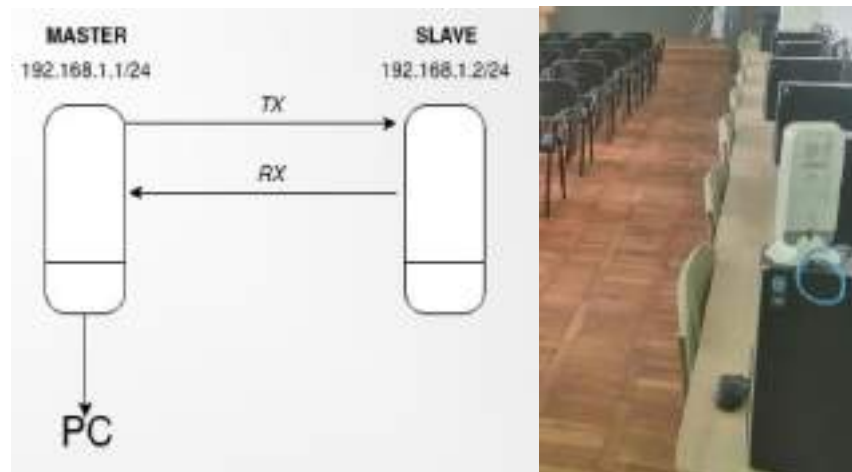


Рисунок 4.27 – Схема тестування лінії зв'язку у навчальній лабораторії

Генератор трафіку може бути використаний як інструмент перевірки пропускної спроможності. Утиліта генерує пакети, які будуть перенаправлені назад у генератор пакетів для збирання додаткових параметрів стану каналу.

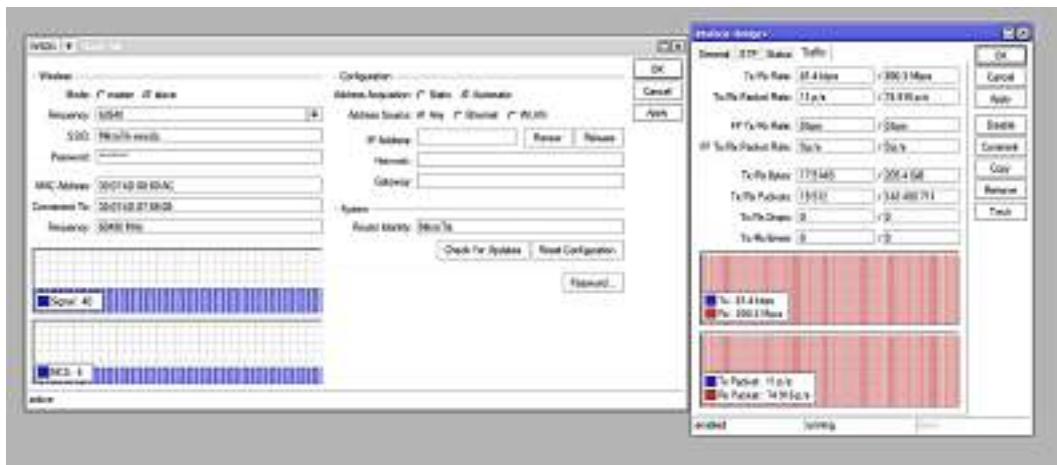
На наведених вище графіках, отриманих в програмному пакеті Win Box, швидкість передачі трафіку близько 1 Гбіт. При чому при рівні сигналу 80 %, швидкість не втрачається.

При різних кутах повороту антени AP (рисунок 4.28) рівень сигналу (Signal) у відсотках змінюється не більше: а) 100 %; б) 40 %; в) 60 %. Рівень модуляції та кодування MCS змінюється у таких межах: а) MCS 8; б) MCS 4; в)

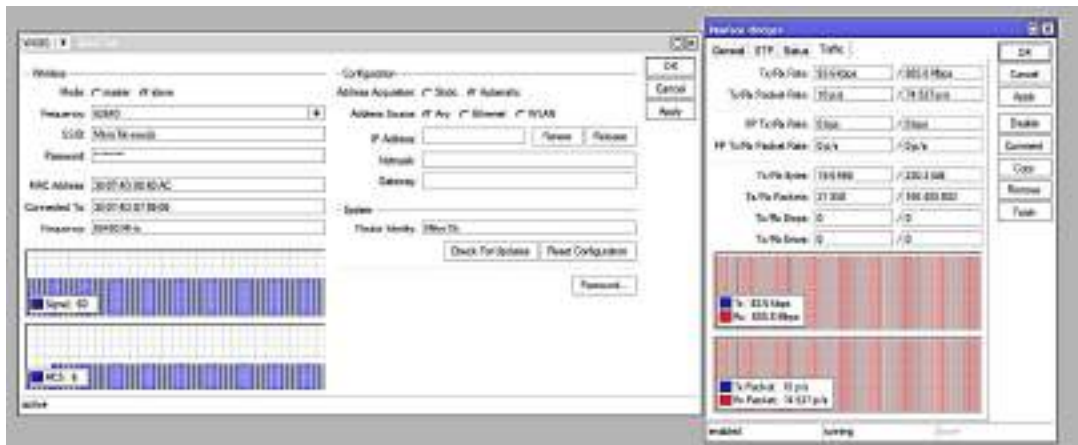
MCS 6. Швидкість передачі С на прийомі (Rx) становить близько 885 Мбіт/с.



а)



б)



в)

Рисунок 4.28 – Основні параметри каналу зв'язку при різних кутах Θ повороту антени АР: а) 0° ; б) 60° ; в) 90°

Висновки по розділу 4

1. Розроблені засоби та методи радіометрії дали можливість вперше отримати кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ ДХ за річний період та помісячно, що забезпечують оцінку надійності високошвидкісних наземних та наземно-космічних каналів зв'язку в Україні.

2. Створено експериментальну приземну лінію зв'язку на основі використання точок доступу *MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit)* у діапазоні 60ГГц (5мм), що дозволило отримати нові дані про енергетичний потенціал лінії зв'язку для відкритого простору (*Outdoor*) та показало реалізованість сценарію розгортання мереж 5G в діапазоні 60 ГГц на базі малих сотів (*Small Cell*). Проведено експериментальні дослідження та отримано результати по пропускній здатності каналу зв'язку міліметрового діапазону хвиль всередині приміщень.

3. На основі експериментально отриманих даних річного циклу безперервних радіометричних спостережень розраховано помісячний та річний кумулятивний розподіл повного вертикального ослаблення в атмосфері для частоти 39ГГц на похилих трасах для кутів 0 градусів, 60 градусів, 70 градусів та 80 градусів.

4. Сформовано базу даних та розраховано кумулятивний розподіл інтенсивності дощів за найбільш несприятливий для здійснення зв'язку 4-х місячний період року для міста Харкова. Розраховано сукупний розподіл питомого загасання атмосфери за 4-місячний період.

5. Проведено порівняльний аналіз кумулятивного розподілу інтенсивності дощу за 4-місячний період (червень-вересень) 2018 р. та 2019 р. для м. Харків (50 Н, 36 Е), Україна. Проведено порівняння оригінальних результатів із даними ІТУ для м. Харкова та м. Львова.

6. Вперше отримані кумулятивні функції розподілу приземного погонного ослаблення радіохвиль СМ та ММ ДХ за річний період та для найгіршого періоду року, необхідні для забезпечення оцінок готовності перспективних мереж та ліній приземного зв'язку в Україні, що відрізняються підвищеним ступенем надійності.

7. Вперше отримано кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного ослаблення радіохвиль ММ ДВ за річний період та помісячно, що забезпечують оцінку надійності інфоємних високошвидкісних наземних та наземно-космічних каналів зв'язку в Україні.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена **актуальна науково-практична задача** розробки методів та засобів підвищення продуктивності та готовності каналів зв'язку міліметрового діапазону радіохвиль, що враховують вплив різноманітних факторів атмосфери та регіональних мікрокліматичних особливостей на поширення та ослаблення радіохвиль.

В ході вирішення вказаної вище задачі отримані такі **наукові результати**:

1. Розроблено вдосконалену математичну модель оцінки продуктивності та готовності системи зв'язку, яка реалізує багатоступеневу апроксимацію ліміту Шеннона та представлена у вигляді комп'ютерної програми в середовищі MATLAB, що дозволяє визначати максимальний радіус зони обслуговування та врахувати: сценарії розгортання системи, параметри кліматичної зони, поглинання в газах, інтенсивність опадів, тип модуляційної схеми та кодування (MCS_i) обладнання.

2. Створено оригінальний програмно-апаратного радіометричного комплексу для частоти 40 ГГц (8мм) та розроблено нову методику проведення річних цілодобових експериментальних досліджень з високим часовим дозволом (1 хвилина та менше), що дозволило після відповідної статистичної обробки результатів вимірювань отримати дані про кумулятивні функції сезонного розподілу повного вертикального атмосферного послаблення продовж року та у найгірші місяці року для забезпечення надійного зв'язку в розглянутому діапазоні частот.

3. Розроблені засоби радіометрії дали можливість вперше отримати кумулятивні функції розподілу повного вертикального атмосферного послаблення радіохвиль ММ ДХ за річний період та помісячно, що забезпечують оцінку надійності високошвидкісних наземних та наземно-космічних каналів зв'язку в Україні.

4. Подальший розвиток отримала математична модель оцінки продуктивності та завадостійкості системи зв'язку в умовах щільної міської

забудови, що дозволяє врахувати діаграми спрямованості антен базових станцій, фазових антенних решіток (ФАР) точок доступу та пристроїв користувачів.

5. Розроблено нову багатопроменеву модель поширення радіохвиль ММ ДХ для закритого простору, яка враховує діелектричні характеристики матеріалів стін, полу та стелі, що дозволило отримати теоретичну оцінку досяжних швидкостей передачі інформації для внутрішніх коридорів будівель (*Indoor*) мережі передачі інформації для апаратури стандарту IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції та кодування (*MCS*) і різні типи антен.

6. Створено експериментальну приземну лінію зв'язку на основі використання точок доступу *MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit)* у діапазоні 60ГГц (5мм), що дозволило отримати нові дані про енергетичний потенціал лінії зв'язку для відкритого простору (*Outdoor*) та показало реалізованість сценарію розгортання мереж 5G в діапазоні 60 ГГц на базі малих сотів (*Small Cell*).

В ході вирішення головної задачі отримані також такі **науково-практичні результати**:

1. Отримано результати натурних випробувань експериментальної приземної лінії зв'язку на основі використання точок доступу *MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit)* у діапазоні 60ГГц (5мм), що дозволяє визначити максимальний радіус зони обслуговування та врахувати: сценарії розгортання системи, параметри кліматичної зони, поглинання в газах, інтенсивність опадів, тип модуляційної схеми та кодування (*MCS_i*) обладнання.

2. Для забезпечення цілодобового моніторингу та збору в автоматичному режимі з хвилинним інтервалом вимірювань радіофізичних і метеорологічних даних в ХНУРЕ розроблено методику досліджень та виготовлено дослідний зразок наземного радіометричного комплексу, в склад якого входить модуляційний радіометр діапазону 40 ГГц (8мм) з флуктуаційною чутливістю 0,2 К та погодна станція.

3. Розроблено програмно-апаратний модуль для сполучення детекторної схеми радіометра з послідовним інтерфейсом ПК, що дозволяє передавати вимірювальну інформацію безпосередньо в електронну таблицю *Excel* для накопичування бази даних.

4. Розроблено методику налаштування програмного додатку *WinBox* для керування пристроями на базі *Mikrotik RouterOS*, яка дозволяє налаштувати безпроводові точки доступу на тестування каналу зв'язку за допомогою трафік генератору, встановлювати параметри з'єднання: діапазон частот, потужність сигналу, протокол мережевої взаємодії (*IP, UDP*), розмір інформаційних пакетів, а також візуалізувати результати виміру рівня сигналу на вході приймача, тип модуляції та кодування сигналу, швидкості передачі параметри та якості з'єднання.

5. Матеріали дисертаційної роботи використовуються в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки на кафедрі радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем в курсах лекцій з дисциплін «Радіопередавальні пристрої» та «Радіоприймальні пристрої» при навчанні студентів освітньо-професійної програми «Інформаційні радіотехнології» та при підготовці магістерських атестаційних робіт, про що є відповідний акт впровадження. (Акт від 18.05.2023 р., м. Харків, Україна).

Подальший розвиток наукових досліджень по напрямку дисертаційної роботи пов'язаний з використанням штучного інтелекту (*Artificial Intelligence - AI*) та технологій глибокого навчання (*Deep Learning - DL*), що дозволить суттєво підвищити швидкість передачі інформації та рівень готовності систем безпроводового зв'язку нового покоління 5G/6G.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kottkamp M, Pandey A, Raddino D, Roessler A, Stuhlfauth R. 5G New Radio. Third, revised edition ed. München: Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG; 2019.
2. Аппаратурно-методическое обеспечение научно-прикладной радиометрии атмосферы / В.К. Волосяк, С.С.Жила, А.Д. Собколов, В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, Д.С. Сальников, А.А. Мерзликин, А.И. Цопа // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Выпуск № 196. – С. 5-21.
3. . Кумулятивные функции вертикального атмосферного ослабления миллиметровых радиоволн над Харьковом / С.С.Жила, А.А. Мерзликин, А.В. Одокиенко, В.В. Павликов, Н.В. Руженцев, А.Д. Собколов, А.И. Цопа // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2019. – Выпуск № 199. – С. 83-90.
4. Определение характеристик готовности и пропускной способности канала связи миллиметрового диапазона волн. / А.А. Мерзликин, Д.С.Сальников, А. Н. Битченко, Н.В. Руженцев, А. И. Цопа // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2019. – Выпуск № 199. – С. 45-53.
5. Tsopa O., Dudka O., Merzlikin A., Astrashkov M. Performance Evaluation of 5G Millimeter-Wave Cellular Network in dense Urban Development / Journal Review of International Geographical Education. – SPRING, 2021; – №11(8); – pp. 1592-1600. (Scopus)
6. Odokienko O.V., Pavlikov V.V, Ruzhentsev N.V., Volosyuk V.K., Zhyla S.S. Two Frequency Radiometric Complex for Atmosphere Research // Proceedings of the 14-th International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2018), Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2018, p. 28 – 31.

7. Том 1 № 28 (2016): Адаптивні системи автоматичного управління . Аналіз розвитку сучасних технологій мобільного зв'язку Ярослав Ігорович Корнага к.т.н., доцент кафедри технічної кібернетики НТУУ «КПІ», Ярослав Євгенович Горбунов студент кафедри технічної кібернетики НТУУ «КПІ»,
8. M. Xiao et al., "Millimeter wave communications for future mobile networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 9, pp. 1909-1935, Sep. 2017.
9. Z. Pi, J. Choi, R. Heath, "Millimeter-wave gigabit broadband evolution toward 5G: Fixed access and backhaul", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 138-144, Apr. 2016.
10. J. G. Andrews et al., "What will 5G be?", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
11. T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!", *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, May 2013.
12. H. Zhao et al., "28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York City," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Jun. 2013, pp. 5163–5167.
13. A. Narayanan, S. T. Veetil, and R. K. Ganti, "Coverage Analysis in Millimeter Wave Cellular Networks with Reflections", in *Proc. IEEE Global Communications Conference*, Singapore, Dec. 2017.
14. V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet, Y. Koucheryavy, "Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1791-1808, Mar. 2017.
15. J. M. Jornet, I. F. Akyildiz, "Low-weight channel coding for interference mitigation in electromagnetic nanonetworks in the terahertz band", in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Jun. 2011, pp. 1-6.
16. J. Kokkonen, J. Lehtomäki, M. Juntti, "A discussion on molecular absorption noise in the terahertz band", *Nano Commun. Netw.*, vol. 8, pp. 35-45, Jun. 2016.

17. Sorrentino, R., Bianchi, G.: 'Microwave and RF engineering' (John Wiley and Sons, West Sussex, UK, 2010), p. 4, ISBN 047066021x
18. IEEE Standard Letter Designations for Radar Frequency Bands', (Revision of IEEE Std 521-1984) vol. no., 2003, pp. 1–3
19. Rappaport, T.S., Heath, JrR.W., Daniels, R.C., et al.: 'Millimeter wave wireless communications', Pearson Education, 2014 Sep 18
20. Michael, M., Chair, J.B., Bruce, F., et al.: 'Report of the unlicensed devices and experimental licenses working group', Federal Communications Commission Spectrum Policy Task Force, 15 November 2002. Available at <http://www.fcc.gov/sptf/files/E&UWGFfinalReport.pdf>
21. J. G. Andrews et al., "What will 5G be?", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
22. Любченко В.Е. Линии связи миллиметрового диапазона волн в локальных информационных сетях / В.Е. Любченко, А.В. Соколов, Л. В. Федорова // Радиотехника. – 1998. –№ 12. –С. 68-75.
23. Хлопов Г. И. Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне / Г. И. Хлопов // Зарубежная радиэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №9. – С. 3-27.
24. Кабісов Р.К. Міліметрові хвилі у системі реабілітації онкологічних хворих/Р.К. Кабісів // Біомедична радіоелектроніки. - 1998. - № 1. - С. 48-55.
25. Chen F.W. AIRS/AMSU/ HSB precipitation estimates / Chen F.W., Staelin DH. // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. — 2003. — V. 41, N22. — P. 410-416.
26. Kummerow C. A simplified scheme for obtained precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors / Kummerow C., Olson WS., Giglio L. // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. — 1996. — V. 34. — P. 1213-1232.
27. R. Polonio. ITALSAT Propagation Experiment at 18,7; 39.6 and 49.5 GHz at Spino D'Adda: Tree Years of CPA Statistics / R. Polonio, C. Riva // IEEE Trans. Antennas and Propag.. — 1998. — 46. — NeS. — с. 631-635.

28. Lin Der-Phone An Empirical Formula for the Prediction of Rain Attenuation in Frequency Range 0,6-100 GHz / Lin Der-Phone, Chen Hsing-Yi // IEEE Trans. Antennas and Propag. — 2002. — 50. — Ned. — p. 545-551.
29. Врублевська О.О., Катеруша Г.П. Навчальний посібник з дисципліни «Клімат України та прикладні аспекти його використання» – Одеса: ОДЕКУ, 2012. – 180 с.
30. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.М. Гауссовская модель многолучевого канала связи в городских условиях / Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. - Вып.2, 2003. - С.127-137.
31. Rec. ITU-RP.1411-7. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor ra-dio communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100GHz.
32. Rec. ITU-R P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.
33. Руженцев Н.В. Вертикальное атмосферное ослабление радиоволн миллиметрового диапазона //Издательство LAMBERT Academic Publishing(Германия), 2015, 128 стр.
34. Bhattacharyya S. Modelling of drop size distribution of rain from rain rate and attenuation measurements at millimeter and optical wavelengths / Bhattacharyya S., Dan Marina, Sen A. K. // Int. J. Infrared and Millim. Waves. — 2000.—21.—№12.—с. 2065-2075/
35. M. Xiao et al., "Millimeter wave communications for future mobile networks", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 9, pp. 1909-1935, Sep. 2017.
36. Y. Yang, A. Shutler, D. Grischkowsky, "Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz", Opt. Express, vol. 19, pp. 8830-8838, Apr. 2011.
37. T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney Jr., A. F. Molisch, E. Mellios, J Zhang, "Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—With a focus on propagation models", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017.

38. M. Xiao et al., "Millimeter wave communications for future mobile networks", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 9, pp. 1909-1935, Sep. 2017.
39. Жоюю Пи, Фарук Хан Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона / Электроника: наука, технологии, бизнес. - 2012, №3. - С.86-94.
40. Руженцев Н.В. О необходимости учета микроклиматических особенностей при прогнозировании вертикального атмосферного ослабления в миллиметровом диапазоне волн / Н.В. Руженцев, А.С. Михайлов // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – Т. 11. – № 1. – С. 66–69.
41. О.А. Войтович. Дистанционное измерение размеров капель воды с помощью двухчастотного зондирования / О.А. Войтович, А.М. Линкова, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // Радіофізика та електроніка. — 2009. — Т. 1(15), № 4. — С. 78-84. — Бібліогр.: 13 назв. — рос.
42. Amendment of part 2 of the commission's rules to allocate additional Spectrum to the inter-satellite, fixed, and Mobile services and to permit unlicensed devices to Use certain segments in the 50.2–50.4 GHz and 51.4- 71.0 GHz bands, FCC 00-442', Federal Communications Commission, December 2000. Available at http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-00-442A1.pdf
43. Шахнович И. Персональные беспроводные сети стандартов IEEE802.15.3 и 802.15.4 –ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, № 6, С.32-36. 3.Викулов И. 4-мм системы связи. Начало реализации. –ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009
44. Н.В. Руженцев. Особенности излучения облачного покрова в миллиметровом диапазоне волн / Н.В. Руженцев // «Радиофизика и Радиоастрономия».– 2003, – т..8. – №.1. – с. 38-44.
45. Recommendation ITU-R P.530-12 Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
46. T. S. Yeo Tropical Raindrop Size Distribution for the Prediction of Rain Attenuation of Microwaves in 10-40 GHz Band / T-S. Yeo, P-S. Kooi, M-S. Leong, L.-W. Li // IEEE Trans. Antennas and Propag. — 2001. - 49. — Nel. — p. 80-83.

47. F. S. Marzano Ground-Based Multifrequency Microwave Radiometry for Rainfall Remote Sensing / F. S. Marzano, E. Fionda, P. Ciotti, A. Martellucci // IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing. — 2002. — 40. — №4. — p. 742-759.
48. Климат Украины (под ред. Липинского В. М.) , из-во Раевского, Кис 2003, 343 с.
49. Литвинов И.В. Осадки в атмосфере и на поверхности земли. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 208с.
50. Рекомендация МСЭ-R P.837-7 (06/2017)
51. А.С. Михайлов. Особенности глобального распределения атмосферного поглощения в диапазоне 10-1000ГГц /А.-С. Михайлов, Н.В. Руженцев//Радиофизика и Радиоастрономия. – 1007. – т.12. - №1.
52. N.V.Ruzhentsev Peculiarities of global distribution of atmosphere absorption at 10-1000GHz range / N.V. Ruzhentsev, A.S. Mikhailov // Proc. Of International Conf. ClimDiff. – Clivland, USA. – Sept. 2005. – p.clim. 11.1-11.5.
53. Pozar, D.M.: ‘Microwave Eng’ (Addison-Wesley Publishing Company, USA,1993), ISBN-0-201-50418-9
54. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитных волн атмосферными частицами. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 348 с
55. Метеорологія і кліматологія : підручник / за ред. С. М. Степаненка. – Одеса : ТЕС, 2010. – 534 с.
56. T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney Jr., A. F. Molisch, E. Mellios, J Zhang, "Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks—With a focus on propagation models", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017.
57. Айвазян Г. М. Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в Облаках. / Справочник под общей редакцией Г. Г. Щукина. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. — 480 с.
58. Зражевский Ю. А. Методика расчёта поглощения в атмосферных парах воды в ММ и СБММ диапазонах / Зражевский Ю. А. // Радиотехника и электроника. — 1976. —т. 21. — №5. — с. 1327-1337.

59. А. Ю. Зражевский. Исследование влияния водяного пара на распространение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов / А. Ю. Зражевский. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Москва: ИРЭ АН СССР. - 1977. — 31 с.

60. С. А. Жевакин. Поглощение электромагнитных волн в 3 мм-7,5 мм диапазонах волн в атмосфере земли / С. А. Жевакин, А. П. Наумов. // Известия ВУЗов «Радиофизика». — 1966. — т.9. - №3. — с. 433—450.

61. Жевакин С. А. О радиотеплолокационном определении интегральной влажности, водности температуры и высоты капельной фазы облаков / Жевакин С. А // Изв. Вузов РФ. — 1978. — т.21.— №8. —с. 121-31

62. Г.А. Андреев Тепловое излучение ММ волн земными покровами / Г.А. Андреев // «Зарубежная радиоэлектроника». — 1982. — №12. - с. 3-39

63. Ю. А. Дрягин. Измерение атмосферного поглощения радиоволн в 1,3—3ММ / Ю. А. Дрягин и др. // Изв. ВУЗов «Радиофизика». — 1966. — т. 9. — №6. с. 1078—1084

64. Г.А. Андреев. Распространение ММ и СБММ волн в тропосфере / Г.А. Андреев и др. — М.: Наука, 1980. — с. 139-163

65. А. Г. Кисляков. В сб.: Спектроскопические исследования космической и атмосферной радиации / А. Г. Кисляков, Ю. Ю. Куликов, В. Г. Рискин. — Россия, Нижний Новгород, 1979. — с. 84-123

66. P. S. Ray Broadband complex refractive indices of ice and water / P. S. Ray // Appl. Optic. — 1972. —v. 11. - №8. — p. 1836-1843

67. Liebe H. J. Millimeter-wave attenuation and delay rates due to fog/cloud conditions / Liebe H. J., Manabe T., Hufford C. H. // IEEE Trans. Ant. Prop. — 1989.— AP-37.— p. 1617-1623

68. ITU-R P.835-3 Reference standard atmospheres. — ITU-R Series Recommendations. — Radiowave Propagation. — 1999.

69. A. Martellucci New reference standard atmospheres based on numerical weather products / A. Martellucci, B. A. Rastburg, J. P. V. Poiars Baptista, G.

Blarzino // Abstracts of International Workshop — ClimDiff. - Fortaleza, Brazil. — 2003. - p.clim.1.

70. Братсерт У. Х. Испарение в атмосферу / Братсерт У. Х., Пер. с англ. — Л.:Гидрометиздат, 1985. — 351 с.

71. Рекомендация МСЭ-R P.837-6 (02/2012)

72. Tsopa A.I., Ivanov V.K., Leonidov V.I., Maleshenko Yu.I., Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V. and Zarudniy A.A. The research program of millimetric radio waves attenuation characteristics on perspective communication lines of Ukraine. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, 2016. P. 638-642.

73. Elkashlan M, Duong T Q, Chen H H. Millimeter-wave communications for 5G: fundamentals: Part I [Guest Editorial] [J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(9):52-54

74. Красюк В.Н., Платонов О.Ю., Мельникова А.Ю. Особенности распространения радиоволн миллиметрового диапазона и перспективы их использования в современных радиотехнических системах / Информационноуправляющие системы. - №4, 2003. - С. 33-38.

75. Ákos Faragó, Péter Kántor, János Z. Bitó Rain Effectson5G millimeterWave ad-hoc Mesh Networks. InvestigatedwithDifferent Rain Models // Periodica Polytechnica: Electrical Engineering and Computer Science. -60(1), pp. 44-50, 2016.14. Molisch A. F.Wireless Communications, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley-IEEE, 2011.

76. Seybold J.,Introduction to RF propagation, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.

77. Kim J.Millimeter Wave Radio Propagation Characteristics / Chapter Book: Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective.— CRC Press, 2016. —577 p.

78. ITU-R Rec. P.838-3.Specific attenuation model for rain for use in prediction methods

79. Tsopa A.I. Methodical maintenance of radiometric measurements of atmosphere at millimeter waves range/V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, D. S. Salnikov, A.I. Tsopa, A.O. Merzlikin// Proc. of XIV International Conf. Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science /TCSET'2018/. –Lviv-Slavsko, 2018. –P. 1-4.

80. Rec. ITU-RP.1411-7. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100GHz.

81. IEEE Std. 802.11ad-2012. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks-Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band.

82. ITU-R Rec. P.1411-7. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100GHz.

83. ITU-R Rec. P.1411-8. Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz. ITU Recommendation, Jul. 2015.

84. ITU-R Rec. F.1336-4. Reference Radiation Patterns of Omnidirectional, Sectoral and Other Antennas for the Fixed and Mobile Service for Use in Sharing Studies in the Frequency Range From 400 MHz to About 70 GHz. ITU Recommendation, Feb. 2014.

85. MiWEBA. Millimetre-Wave Evolution for Backhaul and Access WP5: Propagation, Antennas and Multi-Antenna Techniques D5.1: Channel Modeling and Characterization/FP7. ICT-2013.10.1 -EU-Japan research and development Cooperation.

86. Paul Tattelman, Kevin P. Larson Effects of Rain Attenuation on Satellite EHF Communications in the United States \AFGL-TR-89-0012N

Environmental Research Papers, NO. 1017 Atmospheric sciences division project 6670 Air force geophysics laboratory Hanscom AFB, MA 01731, 1989, 179 pp.

87. ITU-R Rec. F.1336-4. Reference Radiation Patterns of Omnidirectional, Sectoral and Other Antennas for the Fixed and Mobile Service for Use in Sharing Studies in the Frequency Range From 400 MHz to About 70 GHz. ITU Recommendation, Feb. 2014

88. T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!", IEEE Access, vol. 1, pp. 335–349, May 2013.

89. Рекомендація МСЕ-R P.1144-7 (07/2015) Посібник з використання методів прогнозування поширення радіохвиль, розроблених 3-й Дослідницькою комісією по радіозв'язку

90. Recommendation ITU-R P.676-12 (08/2019) Attenuation by atmospheric gases and related effects

91. [Cumulative distribution of rain rate and rain attenuation in Ukraine](#)
Olexiy Odokienko, Anatolii Merzlikin, Vladimir Pavlikov, Nikolay Ruzhentsev, Anton Sobkolov, Oleksandr Tsopa, Dmitry Salnikov, Simeon Zhyla 2019/7/2
Материалы конференции 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT) 62-66 IEEE

92. Liebe H.J. "MPM – an atmospheric millimeter waves propagation model" // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, vol.10, no 6, pp. 631-650.

93. C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", Bell Syst. Tech. J., vol. 27, pp. 379–423, July 1948. ITU-R Rec. P.676-6. Approximate estimation of gaseous attenuation in the frequency range 1 –350 GHz.

94. Luis Emiliani¹, Lorenzo Luini Evaluation of models for the conversion of T-min rainfall distributions to an equivalent one-minute distribution to be used in Colombia // Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N 56, pp. 99-119, Diciembre, 2010.

95. The Handbook on Radiometeorology /edited by Harvey Berger and Marlene Pontes\International Telecommunication Union, Radiocommunication Bureau, Switzerland, 2013, 236pp.

96. Book Wiley & Sons: 60 GHz Technology for Gbps WLAN and WPAN: From Theory to Practice Edited by Su-Khiong (SK) Yong, Pengfei Xia and Alberto Valdes Garcia - 2011 John Wiley & Sons, Ltd

97. Luis Emiliani¹, Lorenzo Luini Evaluation of models for the conversion of T-min rainfall distributions to an equivalent one-minute distribution to be used in Colombia //Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N 56, pp. 99-119, Diciembre, 2010

98. Tsopa A.I., Ivanov V.K., Leonidov V.I., Maleshenko Yu.I., Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V. and Zarudniy A.A. The research program of millimetric radio waves attenuation characteristics on perspective communication lines of Ukraine. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, 2016. P. 638-642.

99. *ETSI TR 102 555*. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM): Technical characteristics of multiple gigabit wireless systems in the 60 GHz range System Reference Document.

100. URL: <https://ntools.com.ua/mikrotik-rbwapg-60ad-kit-wireless-wire>

101. Кумулятивные функции вертикального атмосферного ослабления миллиметровых радиоволн над Харьковом Авторы СС Жила, АА Мерзликин, А.В Одокиенко, В.В Павликов, Н.В Руженцев, А.Д Собколов, А.И Цопа Дата публікації 2019 Журнал Radiotekhnika Випуск 199 Сторінки 83-90

102. *M. Boers, B. Afshar, I. Vassiliou, S. Sarkar, S. T. Nicolson, E. Adabi, B. G. Perumana, T. Chalvatzis, S. Kavvadias, P. Sen, W. L. Chan, A. H. Yu, A. Parsa, M. Nariman, S. Yoon, A. G. Besoli, C. A. Kyriazidou, G. Zochios, J. A. Castaneda, T. Sowlati, M. Rofougaran, and A. Rofougaran..* A 16TX/16RX 60 GHz 802.11ad Chipset With Single Coaxial Interface and Polarization Diversity. *IEEE Journal of Solid State Circuits* 49, 12 (2014)

103. R. Guemri, F. Lucarz, D. Bourreau, C. Kamfelt, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, T. Hall, "Filterless millimetre-wave optical generation using optical phase modulators without DC bias", in Proc. IEEE 10th Conf. Ph.D. Res. Microelectron. Electron. (PRIME), pp. 1-4, Jun.-Jul. 2014.

104. *E. Cohen, M. Ruberto, M. Cohen, O. Degani, S. Ravid, and D. Ritter. A CMOS Bidirectional 32-Element Phased-Array Transceiver at 60 GHz With LTCC Antenna. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 61, 3 (2013)*

105. *S. Emami, R. F. Wisser, E. Ali, M. G. Forbes, M. Q. Gordon, X. Guan, S. Lo, P. T. McElwee, J. Parker, J. R. Tani, J. M. Gilbert, and C. H. Doan. A 60GHz CMOS Phased-Array Transceiver Pair for Multi-Gb/s Wireless Communications. In IEEE International Solid-State Circuits Conference - (2014).*