

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно комунікаційних систем
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ГЮІК.ХХХХХХ.001ПЗ

Дослідження впливу дощу на канал зв'язку

міліметрового діапазону

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи РПСКМ-19-1
Столовий І.В.

(прізвище, ініціали)

спеціальності 172 телекомунікації та
радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні пристрої
системи та комплекси
(повна назва освітньої програми)

Керівник д.т.н. проф. Кафедри РТІКС
Руженцев М.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)
2020 р.

Цопа О.І.
(прізвище, ініціали)

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування.

Керівник

Руженцев М.В.

Студент

Столовий І.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра радіотехнологій інформаційно комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектронні пристрої системи та комплекси

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Столовому Ігору Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження впливу дощу на канал зв'язку міліметрового діапазону

затверджена наказом по університету від 2 листопада 2020 р. № 1507Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 12 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону хвиль в умовах дощу. Передбачити можливість збою роботи радіомоста в опадах

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

2. Аналіз роботи радіомоста міліметрового діапазону

3. Розрахунок загасання радіохвиль в умовах опадів та забудови міліметрового діапазону хвиль

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

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел за темою роботи	05.11.2020	Виконано
2	Огляд впливу дощу на міліметровий діапазон	15.11.2020	Виконано
3	Дослідження особливостей роботи радіомоста мм діапазону хвиль	22.11.2020	Виконано
4	Розрахунок готовності роботи каналу зв'язку міліметрового діапазону	30.11.2020	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та слайдів презентації	05.12.2020	Виконано

Дата видачі завдання 4 вересня 2020 р.

Студент _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Робота містить: сторниць – 76, рисунків – 22, таблиць – 6, посилань на джерела – 24.

Об'єкт дослідження-Поширення радіохвиль ММ ДХ

.

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

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

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

Побудована кумулятивна функція ослаблення радіохвиль в атмосфері і проведено її аналіз

ABSTRACT

The work contains: pages - 76, figures - 22, tables – 6, references to sources - 24.

Object of research is the radio wave propagation.

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

MILLIMETER RANGE. ATMOSPHERIC ABSORPTION, COMMUNICATION LINE, CUMULATIVE DISTRIBUTION

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ПРОБЛЕМИ ПРИ ПОШИРЕННІ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ	9
1.1 Основи поширення радіохвиль.....	9
1.2 Апаратурно-методичне забезпечення методу радіометрії	17
1.3 Проблематика калібрування радіометра	22
1.4 Методи калібрування радіометра	23
2 ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ РІЗНИХ ДІАПАЗОНІВ.....	26
2.1 Поширення радіохвиль	26
2.2 . Механізми поширення радіохвиль.	30
2.3 Особливості поширення радіохвиль різних діапазонів	34
2.4 Поширення УКХ.....	39
3 РОЗВИТОК ТЕХНІКИ МІЛІМЕТРОВИХ І СУБМІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ	42
3.1 Види загасання радіохвиль міліметрового діапазону.....	42
3.2 Області застосування міліметрових і субміліметрових хвиль в науці і техніці і основні напрямки розробок.....	46
3.3 Лінії передачі міліметрових і субміліметрових хвиль.....	49
3.4 Мікростільникові і пікостільникові лінії зв'язку в місті.....	52
4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРАХУНКІВ.....	65
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	69
ДОДАТОК А.....	78
ДОДАТОК Б.....	88

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

ММ – МІЛІМЕТРОВИЙ

СМ-САНТИМЕТРОВИЙ

ДХ – Діапазон хвиль

ITU– International Telecommunication Union

КВП – коефіцієнтом використання поверхні

ДНА – діаграма направленості антени

ВСТУП

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

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

1 ПРОБЛЕМИ ПРИ ПОШИРЕННІ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

1.1 Основи поширення радіохвиль

Канал зв'язку являє собою фізичний носій між передавачем і приймачем. «Модель каналу» - це представлення співвідношення вхід-вихід каналу в математичній формі. Канал накладає обмеження на показники якості зв'язку, впливаючи на швидкість передачі системи, ймовірність помилок та відстань, на якій система може працювати. Однією з проблем моделювання каналів є переклад детальної моделі фізичного поширення у форму, придатну для моделювання.

Існує багато різних типів взаємодій між електромагнітними хвилями, антенами, які їх передають і приймають, та середовищами, за допомогою яких вони поширюються. Усі ці ефекти слід враховувати для того, щоб зрозуміти та проаналізувати роботу бездротових систем зв'язку.

Внутрішній радіоканал відрізняється від традиційного мобільного радіоканалу двома способами. Відстані набагато менші, і навколишнє середовище може змінюватися набагато більше при меншому діапазоні поділу передавача і приймача. На поширення в приміщенні значний вплив мають такі особливості, як планування будівлі, будівельні матеріали та тип будівлі. Проте розповсюдження в приміщенні регулюється тими ж механізмами, що і на відкритому повітрі: відбиття, пропускання, дифракція, розсіювання тощо.

Відбиття відбувається, коли електромагнітна хвиля потрапляє на об'єкт, який має дуже великі розміри порівняно з довжиною хвилі, що поширюється. Відбиття відбувається від поверхні землі, стін та меблів. При відбиванні хвиля може також частково заломлюватися. Коефіцієнти відбиття та заломлення є функціями властивостей матеріалу середовища і, як правило, залежать від поляризації хвилі, кута падіння та частоти хвилі, що поширюється.

Дифракція виникає, коли шлях поширення між передавачем і приймачем перешкоджає поверхні, що має гострий край. Заважаюча поверхня призводить до того, що хвилі згинаються навколо перешкоди, навіть якщо між передавачем і приймачем відсутня пряма видимість. Дифракція залежить від геометрії об'єкта, а також поляризації падаючої хвилі в точці дифракції. Явище дифракції можна зрозуміти, використовуючи Принцип Гюйгенса, який стверджує, що кожен елемент фронту хвилі можна розглядати як точкове джерело для виробництва вторинних вейвлетів, і що ці вейвлети створюють новий фронт хвилі у напрямку поширення. Дифракція спричинена поширенням вторинних хвиль у ділянки, затінені перешкодою

Розсіювання - це процес, коли хвиля змушена відхилитися від прямолінійного шляху за допомогою однієї або декількох локалізованих нерівномірностей у середовищі, через яке вона проходить. Сюди також входить відхилення відбитого випромінювання від кута, передбаченого законом відбиття. Відображення, що зазнають розсіювання, часто називають дифузними, а відбиття, що слідує закону Снелла, - дзеркальними. Розсіювання призводить до поширення енергії радіохвилі у багатьох напрямках, і хвиля також деполяризується. Розсіяні хвилі створюються нерівними поверхнями, дрібними предметами або іншими нерівностями на шляху поширення, коли число цих нерівностей велике. Ступінь розсіювання залежить від кута падіння та нерівності поверхні порівняно з довжиною хвилі.

Канал поширення є частиною каналу зв'язку між передавальною та приймальною антенами. Міліметровий (мм-хвильовий) внутрішній радіоканал, який розглядається в цій роботі, по суті є багатопроменевим каналом. Якщо один імпульс передається по багатопроменевому каналу, то отриманий сигнал буде відображатися як імпульсний шлейф, причому кожен імпульс у шлейфі відповідає компоненту прямої видимості, окремому багатопроменевому компоненту від окремого розсіювача та дифузному багатопроменевому шляху група розкидачів. Розподіл часової затримки багатопроменевого каналу може призвести до значних спотворень

прийнятого сигналу. Параметри багатопробеневого каналу, такі як втрата траси, розширення затримки та розкид кутів описують статистичні властивості каналу.

Втрата шляху - це середнє значення відношення переданої потужності до отриманої потужності між двома антенами, як правило, виражається в децибелах. Вона включає всі види збитків пов'язані з взаємодією між поширеною хвилею та будь-якими об'єктами між передавальною та приймальною антенами. Однією з основних цілей моделювання розповсюдження є передбачити втрату шляху якомога точніше.

У реальному середовищі розповсюдження втрати шляху не є постійними для даної відстані передавача та приймача. Об'єкти вздовж шляху розповсюдження на певній відстані будуть різними для кожного шляху, що спричиняє варіацію щодо значення, заданого простими моделями втрат шляху. Деякі шляхи зазнають збільшених втрат, тоді як інші будуть менш заважати і збільшуватимуть потужність сигналу. Це явище називається тінювим або повільним вицвітанням.

Навіть після того, як були передбачені втрати траси та затінення для певних місць, все ще існують значні зміни в прийнятому сигналі, коли антена переміщується на відносно невеликій відстані. Причиною цього є те, що отриманий сигнал є сумою багатьох внесків, що надходять з різних напрямків. Оскільки фази випадкові, амплітуда суми коливається в широкому діапазоні, до 30-40 дБ. Це явище називають швидким згасанням, а коливання сигналу настільки швидким, що його можна передбачити лише статистичними засобами.

Імпульсна характеристика - це широкосмугова характеристика каналу, яка може бути використана для отримання інформації, необхідної для моделювання та аналізу будь-якого типу радіопередачі через канал. Це пояснюється тим, що мобільний радіоканал може бути змодельований як лінійна система з часовим варіантом кінцевої імпульсної характеристики.

Моделі каналів використовуються для прогнозування поведінки радіоканалів у конкретних середовищах без необхідності їх вимірювання. Моделі каналів можуть бути використані для моделювання каналів для тестування прототипів системи зв'язку. Моделі каналів доступні для різних середовищ, як у приміщенні, так і на відкритому повітрі. Моделі внутрішніх каналів можна розділити залежно від типу

будівлі, наприклад, житлових, виробничих та офісних приміщень, або на основі масштабу каналу розповсюдження, наприклад, у межах приміщення, в межах підлоги або між поверхами

Існує три типи моделей поширення радіохвиль:

- емпіричні моделі базуються на даних вимірювань. Вони описуються лише за кількома параметрами, використовуючи статистичні властивості. Це має ту перевагу, що враховує всі фактори поширення, як відомі, так і невідомі

- детерміновані моделі - вони оцінюють поширення радіохвиль аналітично. Вони вимагають величезної кількості точної геометричної інформації про місце розташування та дуже великих обчислювальних зусиль. До детермінованих методів моделювання належать область різної часової різниці, метод моментів і трасування променів (RT).

- напівдетерміновані моделі базуються на емпіричних моделях з детермінованими аспектами, що поєднують як результати комп'ютерного моделювання, так і вимірювання

Для зовнішнього середовища загальноживаними моделями каналів є модель Hata (від 150 МГц до 1500 МГц), модель COST 321 (від 1 ГГц до 3 ГГц) або модель Erceg (від 1 ГГц до 3 ГГц).

Кількість кластерів є важливим параметром для моделей каналів. У літературі з'являються різні визначення кластеризації. Скупчення визначається групою променів, що надходять приблизно в один і той же час і під кутом. Визначено різні методи ідентифікації кластерів, починаючи від простої візуальної перевірки та вдосконалюючи обробку сигналів, наприклад, оцінку щільності ядра. Для опису кількості кластерів широкосмугових систем були отримані різні результати. Кількість скупчень розподілена за Пуассоном і може бути повністю охарактеризована середньою кількістю скупчень.

З моменту першої бездротової трансатлантичної демонстрації передачі радіохвиль, проведеної Марконі в 1901 році (на основі довгохвильових хвиль), бездротовий зв'язок зазнав надзвичайного зростання. Вперше бездротовий зв'язок використовували переважно військові та судноплавні компанії. Пізніше швидко

розширився у комерційне використання, наприклад, послуги комерційного мовлення (такі як короткохвильове, АМ та FM-радіо, ефірне телебачення), стільникова телефонія та служба глобального позиціонування (GPS), бездротова локальна мережа (WLAN) та бездротова особиста мережа Технології WPAN). Сьогодні ці системи бездротового зв'язку стали невід'ємною частиною повсякденного життя і продовжують розвиватися, забезпечуючи кращу якість та зручність користування. Однією з останніх технологій бездротового зв'язку, що виникають, є технологія мм-хвиль. Технологія мм-хвилі відома вже багато десятиліть, але в основному застосовується для військових застосувань.

За останнє десятиліття досягнення технологічних процесів та недорогі інтеграційні рішення зробили mm-wave технологією, яку слід спостерігати, і почали залучати великий інтерес з боку наукових кіл, промисловості та органів стандартизації. Технологія мм-хвиль стосується тієї частини електромагнітного спектра між 30 і 300 ГГц, що відповідає довжинам хвиль від 10 мм до 1 мм. Це дослідження зосереджується конкретно на радіостанції 60 ГГц, що забезпечує безліч нових програм, які важко запропонувати бездротовим системам на нижчих частотах.

Технологія 60 ГГц пропонує різні переваги перед існуючими системами зв'язку. Однією з основних причин недавнього інтересу до технології 60 ГГц є величезна неліцензована пропускна здатність. Порівняно з неліцензійною пропускною здатністю, виділеною для цілей надширококутового діапазону (UWB), смуга пропускання 60 ГГц є безперервною і менш обмеженою з точки зору обмежень потужності. Система UWB - це система накладання та підпадає під дуже суворі та різні норми. Велика пропускна здатність на частоті 60 ГГц є однією з найбільших неліцензійних смуг пропускання, яка коли-небудь виділялася. Ця величезна пропускна здатність представляє великий потенціал з точки зору ємності та гнучкості, що робить технологію 60 ГГц особливо привабливою для гігабітних бездротових додатків.

Вихідна потужність підсилювача потужності для 60 ГГц, як правило, обмежується 10 дБм, оскільки впровадження ефективних підсилювачів потужності на цій частоті є дуже складним завданням, хоча норми FCC дозволяють до 27 дБм.

Великий коефіцієнт посилення антени до 40 дБі збільшив допустимі межі EIRP. Хоча системи UWB, які повинні відповідати суворій масці спектра потужності $-341,3$ дБм / МГц, пропонують лише дуже обмежену EIRP порядку 10 дБм. Це робить систему UWB пристроєм малої дальності та малої потужності. Навпаки, конструкція підсилювачів потужності для частот 2,4 / 5,0 ГГц простіша і може подавати набагато більшу потужність, ніж система 60 ГГц. Однак обмеження EIRP зазвичай до 30 дБм через переповнений промисловий, науковий та медичний діапазон.

Величезна пропускна здатність, доступна для 60 ГГц, спрощує дизайн системи. Система з набагато нижчою спектральною ефективністю може бути розроблена для забезпечення передачі в Гбіт / с для забезпечення низької вартості та простоти реалізації.

Типова система 60 ГГц вимагає лише 0,4 біт / Гц для досягнення 1 Гбіт / с, що робить її ідеальним кандидатом для підтримки додатків з високою швидкістю передачі даних за допомогою простої модуляції. Хоча система UWB вимагає лише 2 біт / Гц для досягнення 1 Гбіт / с, її фактичне розгортання обмежене 400 Мбіт / с при робочому діапазоні 1 м. Для систем, схожих на IEEE 802.11n, для досягнення 1 Гбіт / с буде потрібно 25 біт / Гц, що робить розширення такої системи понад 1 Гбіт / с непривабливим з точки зору вартості та реалізації.

Призначення великої смуги пропускання близько 60 ГГц створило нові можливості для інтерфейсної технології 60 ГГц. Зокрема, технологія польового транзистора (FET) арсеніду галію (GaAs) розвинулася до такої міри, що ММІС GaAs 60 ГГц (інтегральні схеми мм хвилі) готові до виробництва.

При 60 ГГц втрат вільного простору значно більше, ніж при 2 або 5 ГГц, оскільки втрати вільного простору квадратично зростають із частотою. В принципі цю більшу втрату можна компенсувати використанням антен з більшою спрямованістю при збереженні малих розмірів антени. Однак, коли такі антени використовуються, перешкода антени (наприклад, тілом людини) та неправильне наведення можуть легко спричинити значне падіння отриманої потужності, що може звести нанівець посилення, яке забезпечують антени. Цей ефект характерний для

мм-хвиль, оскільки дифракція мм-хвиль (тобто здатність згинатися навколо країв перешкод) є слабкою. Щодо блокуючих ефектів, різноспрямовані антени мають перевагу у відбиваючому (наприклад, у приміщенні) середовищі, оскільки там вони мають можливість все ще збирати внески відбитої потужності у разі прямої видимості.

Стіни можуть значно послабити мм-хвилі. Коефіцієнт пропускання сильно залежить від властивостей матеріалу та товщини. При частоті 60 ГГц коефіцієнт пропускання скла може становити від 3 до 7 дБ, тоді як передача через бетонну стіну товщиною 15 см може становити до 36 дБ. Це допомагає створити невеликі внутрішні осередки для спілкування в гарячих точках. Типова / поміркована внутрішня стінка, що складається з декількох перегородок різні матеріали (наприклад, вікна та двері), навпаки, не можуть вважатися ні надійною межею комірки, ні прозорим середовищем. Через можливе значне послаблення внутрішніх стін, як правило, буде потрібно мати принаймні одну точку доступу на внутрішнє середовище (кімната, зал, коридор тощо) для створення надійного спільного середовища. Наслідком обмеження для менших комірок є те, що дисперсія каналу менша, ніж значення, що зустрічаються на нижчих частотах, оскільки ехопротоки в середньому коротші. Очікується, що він буде найвищим, якщо всеспрямовані антени використовуватимуться у великих відбивних приміщеннях. Коли замість цього використовуються антени з високим коефіцієнтом посилення, середньоквадратичне поширення затримки може бути обмежене лише кількома наносекундами.

Однією з основних причин погіршення щільності електромагнітної енергії під час поширення є поступове поглинання хвилі середовищем. Це поглинання енергії відбувається головним чином за рахунок молекулярного поглинання атмосферними газами та поглинання або розсіювання рідиною і твердими частинками в атмосфері, особливо дощовими краплями.

Оскільки азот не має смуг поглинання в діапазоні радіочастот, поглинання майже повністю відбувається за рахунок кисню та водяної пари. У діапазоні частот від 57,5 ГГц до 62,5 ГГц в нижній частині атмосфери питома послаблення за рахунок кисню зазвичай становить 14,7 дБ / км.

Міліметрові хвилі мають загальну властивість, що поведінка променів поширення характеризується геометричною оптикою. Ці хвилі не проникають крізь стіни, і відбиття є основним механізмом, що веде до багатопроменевості. Розсіювання та дифракція вважаються набагато менш важливими.

Основними параметрами, що цікавлять модель каналу, є NRP (нормалізована отримана потужність), K-коефіцієнт Рісія та RDS (середньоквадратичне розподіл затримки). Більшість досліджень повідомляють про результати NRP та RDS. Різні дослідницькі групи проводили вимірювання, що урізноманітнювались за такими параметрами:

- використовуване вимірювальне обладнання та метод.
- характеристики та конфігурації антени.
- досліджене середовище.

Це порівняння організовується шляхом обговорення параметрів, що цікавлять, та детального вивчення впливу деяких із перерахованих вище факторів. Враховуються лише широкосмугові вимірювання через важливість характеристики тимчасово-дисперсійного характеру каналу.

Більшість вимірювань у приміщенні використовують векторні мережеві аналізатори для сканування функції передачі каналів. Умовами використання векторного аналізатора мережі є короткі відстані, оскільки між передавальною та приймаючою сторонами повинна бути передбачена опора фази. У (квазі) статичному каналі потрібен час, щоб придбати функцію передачі частоти. Ці умови є обґрунтованими для сценаріїв у приміщенні. Передається вузькосмуговий (безперервна хвиля) сигнал, в якому зосереджена вся потужність передачі. Зазначена роздільна здатність часу затримки зазвичай становить близько 1 нс, що відповідає пропускну здатності сканування 1–2 ГГц.

Звукові сигнали кореляційного типу були розроблені для вимірювань, проведених у проекті RACE-MBS. Окремий ехолот внутрішнього каналу заснований на передачі псевдовипадкової двійкової послідовності та ковзного корелятора на стороні приймача.

RDS, NRP та коефіцієнт Rician є трьома найбільш значущими параметрами для визначення частотно-селективної природи каналу. RDS визначає кількість зникнення в смузі пропускання, тоді як коефіцієнт K визначає глибину затухання. Нормоване прийняте потужність (NRP) визначає середнє відношення сигнал / шум (SNR). SNR зазвичай розглядається як змінна в будь-яких видах системних досліджень.

1.2 Апаратурно-методичне забезпечення методу радіометрії

Радіометр 8 ММ ДВ побудований за модуляційною схемою з приймачем супергетеродинного типу, в якому використовується двосмуговий режим прийому. Він складається з наступних елементів: антена (А), PIN діодний модулятор (PINDM), феритовий циркулятор (FC), змішувач (М), осцилятор на діод Ганна (GO), усилительпромежуточної частоти (IFA), квадратичний детектор (SqD), синхронний детектор (SD), підсилювач постійного струму (DCA), аналого-цифровий перетворювач (ADC), персональний комп'ютер (PC).

Радіометрична система передбачає можливість переведення радіометра з режиму вимірів радіояркості в режим поляризаційних вимірювань, при якому на виході радіометра виділяється сигнал різниці радіояркостних температур між вертикальної і горизонтальної поляризаціями. Такий режим роботи становить інтерес для задач дистанційного дослідження мікроструктури кристалічної складової хмар або при дослідженнях поляризаційних відмінностей земних покривів і об'єктів техніки. Технічне забезпечення поляриметричного режиму роботи здійснюється за рахунок використання в якості модулятора спеціальних феритових Y-перемикачів [28] навантажених на дві антени, налаштовані на прийом різних поляризацій. Вихідний сигнал такого радіометра характеризує величину відмінностей радіояркостної температури об'єкта, на який спрямовані обидві антени.

В якості допоміжного обладнання до складу вимірювального комплексу входять PC для обробки даних і калібрувальні навантаження, виконані у вигляді

оригінальної 3-х шарової конструкції з високоефективного радіопоглощаючого матеріалу, що складається з голчастим-сітчастої килимової структури типу «Ворс», радіопоглощаючого шару об'ємної структури, виготовленого в вигляді полотна трикотажного переплетення, а також шару нецелюлозний (кремнієвоволоконної) паперу типу АРР з профільованою поверхнею.

В якості антени радіометра з центральною частотою настройки приймача 40 ГГц використаний діагональний рупор з апертурою 50×50 мм², що забезпечило ширину діаграми спрямованості (ДН) близько 5° при УБЛ -18 дБ і на кроссполаризаційному рівні -14 дБ [29]. Модулятор на PIN діод U-7.2.242011 забезпечує в смузі 39-42 ГГц втрати сигналу менш 0.5дБ, а величина втрат переключаючого ферритового Y-циркулятора становить в прямому напрямку 0.4 дБ при зворотних втрати понад 20 дБ. Цей циркулятор виконує функції вентиля при роботі системи в звичайному режимі радіометра і функції модулятора сигналів від двох ідентичних антен з різною поляризацією при роботі в режимі радіометра-поляриметра.

Після Y-циркулятора прийнятий сигнал потрапляє на вхід волноводного спрямованого відгалужувачі, що має втрати сигнального каналу 0.5дБ при спрямованості -18дБ і втрати в каналі гетеродина - 14дБ. До виходу спрямованого відгалужувачі підключений змішувач з резонатора камерою зниженого перетину хвилеводу, в якій розташований змішувальний діод з бар'єром Шотткібезкорпусного типу.

В якості гетеродина використаний генератор Ганна з вихідною потужністю близько 15 мВт на частоті 40 ГГц. Резонаторна камера гетеродина є відрізком стандартного хвилеводу 8мм з вбудованим в нього діодом марки «ААА 727В». Резонаторна камера навантажена з одного боку на циліндричний резонатор, а з іншого боку з'єднана з ферритовимциркулятором, через який сигнал гетеродина проходить до спрямованого відгалужувача.

З виходу змішувача сигнал проміжної частоти надходить на малошумящий попередній підсилювач і каскади УПЧ, які виконані на стандартних модулях УТР-5.

Смуга пропускання вузла УПЧ 500-1000МГц при коефіцієнті посилення близько 60 дБ.

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

Стільникова структура безкорпусного змішувального діода з бар'єром Шоттки, генераторний діод Ганна і широкосмуговий PIN діодний модулятор з малим рівнем втрат виготовлені в НДІ ПП м Томська (Росія). Інші елементи НВЧ тракту були виготовлені на дослідному виробництві ІРЕ НАНУ (м.Харків, Україна).

Таким чином, відзначимо, що загальні СВЧ втрати сигналу у вхідному тракті радіометра склали близько 2дБ. Оціночна величина втрат перетворення змішувача близька до 7дБ.

Вибрані схемні і апаратурні рішення забезпечили вимірю методом двох навантажень [30] флуктуаційну чутливість побудованого радіометра близько 0.2 К, що знаходиться в хорошому відповідно до проведених попередніми оцінками цього основного параметра радіометра.

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

На рис. 1.1 представлений фрагмент запису зміни радіояркості неба на 94 ГГц (верхня крива) і 40 ГГц при проходженні фронтальної зони хмарності з 7 вечора до 8-ї години ранку. В [1] було показано, що представлені на цьому малюнку дані про радіояркості неба дозволяють відновити динаміку зміни значень повного вертикального ослаблення в атмосфері, значення ефективної температури крапельної вологи в хмарному покриві, а також значення водозапаса і Вологозапаси хмар.

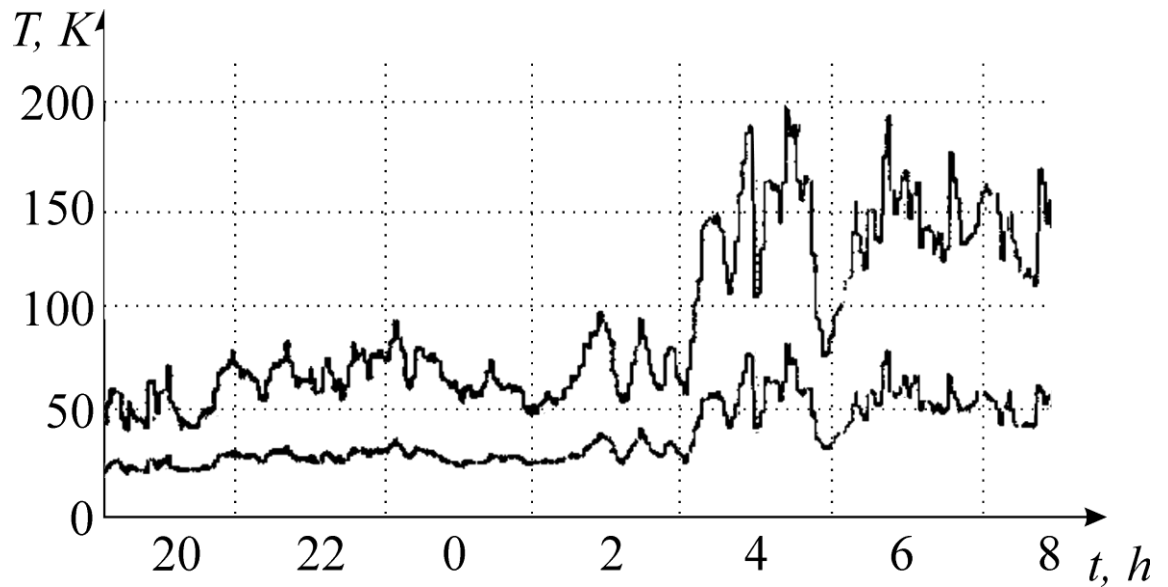


Рисунок 1.1 - зміни радіояркості неба в діапазонах 40 ГГц (нижня крива) і 94 ГГц (верхня) при проходженні атмосферного фронту

Особливість штатного режиму цифрової обробки сигналів в радіометрі в тому, що для забезпечення задається апаратурними параметрами флуктуаційної чутливості використовується 16-бітний АЦП фірми AnalogDevicetипа ADS1115, а джерело опорного напруги і вбудований підсилювач дозволяють вимірювати малі напруги без обмежень на дозвіл АЦП. Вимірювання можуть проводитися з частотою до 800 SPS, а результати вимірювання з АЦП по послідовному інтерфейсу I2C надходять на мікропроцесорний блок попередньої обробки. Розроблений інтерфейс забезпечує передачу даних на РС і формування Excel таблиці з результатами вимірів, що забезпечує зручність накопичення та подальшої обробки отриманих даних.

На рисунку 1.2 представлений приклад таблиці в Ексель і графіка

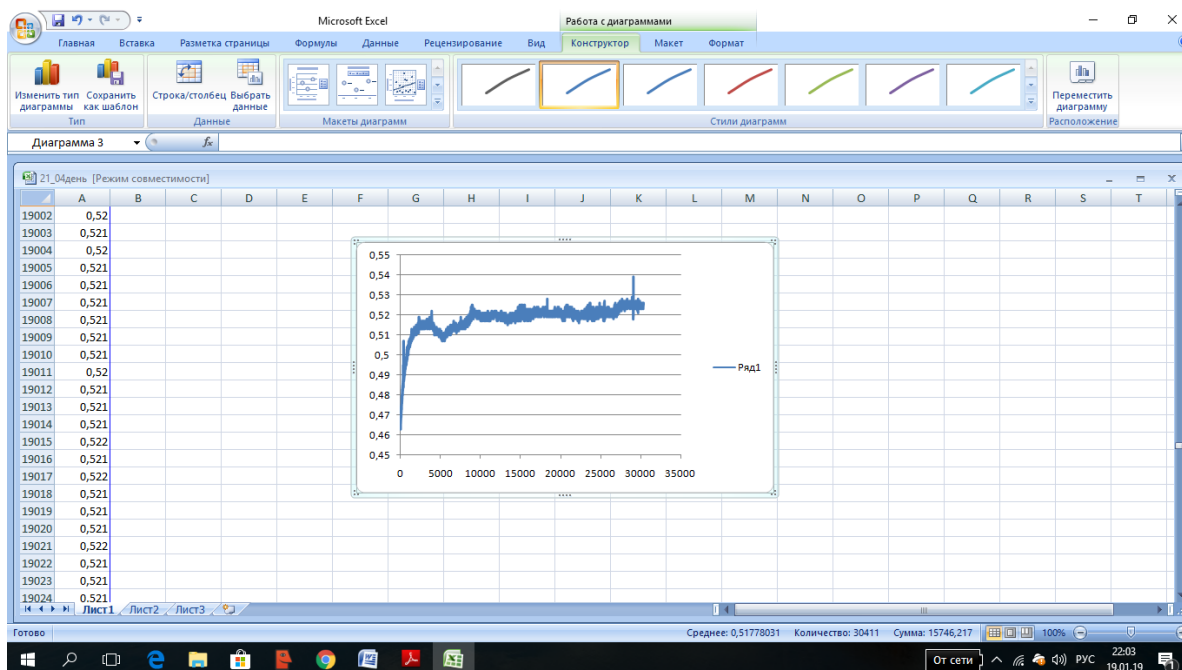


Рисунок 1.2 - Приклад таблиці Ексель і графіка

В останні роки в світі намітилася тенденція зменшення маси і габаритів метеорологічних радіолокаторів за рахунок переходу до більш коротких довжин хвиль і використання твердотільних комплектуючих великої потужності.

У ситуації, що світовій практиці міліметровий діапазон довжин хвиль вважався неперспективним і практично не використовувався. Передбачалося, що в ясну погоду, коли відсутні опади і хмари, в міліметровому діапазоні будуть занадто слабкі відбиття, оскільки сигнал в цих умовах формується від флуктуацій показника заломлення. У прикордонному шарі нижній масштаб неоднорідностей становить кілька міліметрів, тому формування відбиття в безхмарну погоду від турбулентних неоднорідностей на довжині хвилі 8 мм є цілком реальним. Крім того, відповідно до закону Релея в міліметровому діапазоні (в порівнянні з дециметровому) на кілька порядків зростає відбиття аерозолів. Це забезпечує перевагу міліметрового профайлера при наявності будь-яких аерозолів. Зазначена властивість дозволяє проводити вітрові вимірювання в міліметровому діапазоні в будь-яких складних метеорологічних умовах: в тумані, при наявності хмар і опадів, проходженні фронтів, при сильних вітрах.

Відзначимо також, що використання коротких довжин хвиль в імпульсно-когерентних РЛС призводить до наростання проблем, пов'язаних з неоднозначністю вимірювання швидкості і дальності, хоча це завдання може бути ефективно вирішена за рахунок спеціальної кореляційної обробки сигналів

У 2010-і рр. був створений когерентний доплеровський радіолокатор 8 мм діапазону довжин хвиль для вимірювання профілів вітру в широкому діапазоні метеоумов. Виявилось, що в середній смузі Росії радіолокаційні відображення в нижньому 300-500-метровому шарі атмосфери формуються в 70-80% випадків навіть під час відсутності опадів або хмар. Даний факт виявився несподіваним для фахівців.

1.3 Проблематика калібрування радіометра

Калібрування радіотеплолокаційної системи необхідна для встановлення відповідності між вимірюваною радіо яркостною температурою досліджуваного об'єкта і вихідним сигналом радіометричного приймача.

На практиці застосовуються різні методи калібрування, що включають як повну калібрування всієї системи, так і калібрування окремих її частин, зокрема антени, тракту і мікрохвильового радіометра.

Для реалізації ідеальної калібрування радіотеплолокаційної системи необхідно мати набір випромінюючих елементів, розташованих в далекій зоні антени. Ці елементи повинні мати відомі значення рят, що перекривають весь діапазон її можливої зміни для досліджуваних об'єктів, а також достатню просторову протяжність, що перевищує розміри плями осреднення головної пелюстки діаграми спрямованості антени (ДНА). Однак на практиці такий ідеальний метод калібрування важко реалізуємо. Тому зазвичай калібрування радіотеплолокаційної системи проводять окремо для антени і для радіометричного приймача. При цьому для калібрування шкали радіометра, як правило, використовуються внутрішні еталонні джерела шуму.

Антенна температура пропорційна потужності сигналу, підведеного до входу цього приймача. Сигнал, що приймається лінійно посилюється і піддається квадратичному детектуванню. Цим встановлюється лінійна залежність між вхідною потужністю і вихідною напругою приймача, що має вигляд

$$U_a = S T_a + U_0 \quad (1.1)$$

Сучасні радіометри мають досить високу флуктуаційну чутливість. Однак нестабільність таких параметрів, як частота гетеродина, коефіцієнт посилення і Др., А також втрати перетворення в супергетеродинних приємнікахприводят до повільного тимчасового дрейфу параметрів S і U_0 .Поетому для забезпечення необхідної точності вимірювань Тятребується періодичне визначення значень S і U_0 . У цьому, власне, і полягає завдання калібрування радіометричного приймача.

1.4 Методи калібрування радіометра

Калібрування методом різницевих сигналів прийнятих з зенітного напрямки ясного неба і узгодженої навантаження антени з подальшим підсумовуванням цієї різниці з різницевим сигналом між напрямками 60° от зеніту і напрямком в зеніт. Зазначена сума сигналів буде знаходитися в хорошому відповідно до відомої величиною термодинамічної температури навантаження. Це пов'язано з тим, що радіотепловое випромінювання неба в напрямку 60° від зеніту з високим ступенем точності становить величину рівну $2T_a$ зеніту.

Тут калібрувальний коефіцієнт α (К \ Вольт) можна записати, як:

$$\alpha = (T_0) \{ (V_0 - V_z) + (V_{60} - V_z) \} \quad (1.2)$$

де V_0, V_z, V_{60} – відповідно напруги на виході радіометра при направленні його антени на узгоджене навантаження, в зеніт і в напрямку 60° від зеніту, а T_0 термодинамічна температура узгодженої навантаження антени.

Тоді антенну температуру - T_a в довільному напрямку візування антени радіометра можна визначити з виразу:

$$T_{ai} = T_0 - \alpha(V_0 - V_i) \quad (1.3)$$

Зв'язок величин радіояркості T_b і T_a спадного випромінювання атмосфери можна записати як:

$$T_a = T_b(1 - \beta) + 2.7e^{-\tau} \times (1 - \beta) + \overline{T_{ph}} \times \beta \quad (1.4)$$

де β - параметр, що враховує розсіювання поза основної пелюстки ДН антеною системи (АС) і теплові втрати в ній τ , - оптична товщина атмосфери, T_{ph} - усереднене значення фонового випромінювання.

Калібрування методом «штучного місяця» - узгодженого навантаження опромінювача, що знаходиться при кімнатній температурі і при температурі кипіння рідкого азоту.

Тут калібрувальний коефіцієнт α (К / Вольт) можна записати, як:

$$\alpha = (T_{ил} - T_{аз}) / (V_{ил} - V_{аз}) \quad (1.5)$$

де $T_{ил}$, $T_{аз}$ и $V_{ил}$, $V_{аз}$ - відповідно термодинамічні температури і напруженія на виході радіометра при направленні його антени на диск штучної місяця і в зеніт.

У даній методиці використовуються процедури вимірювання антеної температури радіометра при розташуванні антени орієнтованої в зеніт. На першому етапі вимірюється T_a , коли головний промінь ДН антени перекривається радіопоглощающою диском ($T_{амм}$). На другому етапі радіопоглощающою диск перекриває повний промінь ДН ($T_{амс}$), тобто сектор кутів, які не затінений блендой. Вирази T_a для обох цих випадків мають вигляд

$$T_{a_{мм}} = T_{o_m} (1 - \beta)\eta + T_{o_{bl}} \beta_i \eta + \overline{T_{bz}} \beta_{ni} \eta + T_o (1 - \eta) \quad (1.6)$$

$$T_{a_{амс}} = T_{o_m} (1 - \beta)\eta + T_{o_{bl}} \beta_i \eta + \overline{T_{om}} \beta_{ni} + T_o (1 - \eta) \quad (1.7)$$

Максимальну точність визначення T_a атмосфери (близько 3%) можна отримати, вимірюючи розсіювання антени методом «штучного місяця» і калібруючи радіометр за допомогою охолоджувальної рідким азотом узгодженого навантаження опромінювача

Точність методів калібрування і методів вимірювання параметрів розсіювання антен, які використовують просторову (угломестной) переорієнтацію

антени нижче за рахунок зміни інтенсивності фону, прийнятого задніми і бічними пелюстками ДН антени.

Однак, у випадках, коли не потрібно настільки висока точність визначення вимірюваної інтенсивності спадного випромінювання атмосфери або джерела космічного випромінювання, має сенс використовувати більш прості і зручні в реалізації методи вимірювань.

Наприклад, описаний вище метод, який враховує різниці сигналів прийнятих з зенітного напрямки ясного неба і узгодженої навантаження антени з подальшим підсумовуванням цієї різниці з різницею сигналом між напрямками 60° від зеніту і напрямком в зеніт.

2 ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ РІЗНИХ ДІАПАЗОНІВ

2.1 Поширення радіохвиль

Радіотехнічні системи, призначені для зв'язку, радіолокації, телебачення, навігації та інших цілей, відрізняються складовими пристроями радіотехнічного тракту, однак для задач поширення радіохвиль можна уявити узагальнену схему таких радіосистем. На рисунку 2.1 показана така узагальнена схема, що включає передавальну і приймальну частини. Передавальна частина має в своєму складі радіопередавальний блок, за допомогою якого радіосигнал створюється і підводиться до антени, і антену - випромінювач радіохвиль. Приймальна частина радіосистеми має приймальну антену і радіоприймальний блок, на який подається прийнятий антеною сигнал для обробки і виділення інформації, що передається. Проміж приймальною та передавальною антенами розташовується середовище поширення.

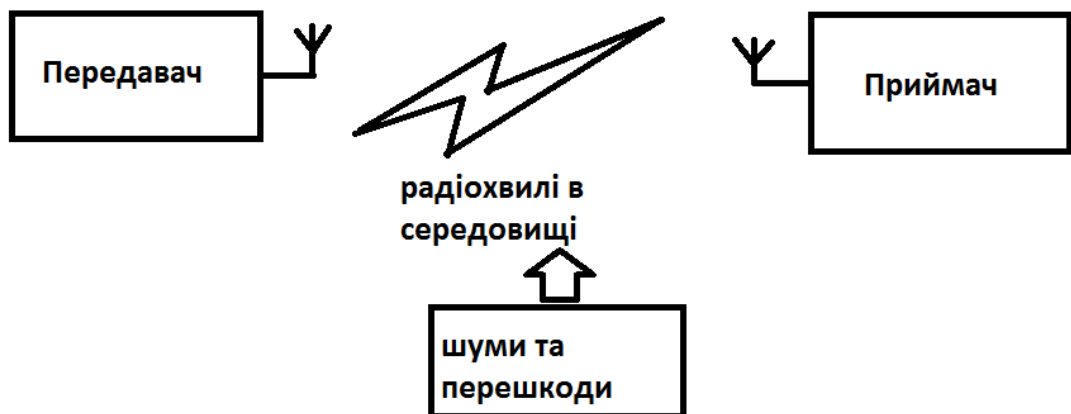


Рисунок. 2.1 - Умовна схема радіотехнічної системи

При роботі радіосистеми важливі умови поширення радіохвиль на трасі передавальна антена - приймальна антена; ця траса може містити різні середовища: різні шари атмосфери, поверхню суші і моря. При поширенні хвиль через такі середовища сигнали зазвичай відчувають ослаблення і спотворення, пов'язані з поглинанням, відбиттям або рефракцією радіохвиль. Крім того, в радіолінії завжди

присутні перешкоди різного роду. Внаслідок цього при розгляді процесів поширення радіохвиль вирішуються три основні завдання, а саме:

- розрахувати напруженість електромагнітного поля в місці прийому при відомих параметрах передавача і заданої довжини хвилі;
- вивчити виникаючі в процесі поширення спотворення форми сигналу та прийняти заходи по їх усуненню;
- визначити справжню швидкість і напрямок приходу радіосигналу.

Незалежно від типу радіосистеми і виду радіолінії, переносником сигналу (інформації) виступають радіохвилі. Радіохвилі - електромагнітне поле, вільно розповсюджується в просторі у вигляді хвиль з певною частотою коливань. Відповідно до особливостей поширення і застосування радіохвиль весь спектр радіочастот поділений на діапазони.

Таким чином, в кожен діапазон входять радіохвилі з перекриттям 10: 1 по частоті. Слід зауважити, що сам факт поділу всього спектра на ділянки з однаковим перекриттям має дещо штучний характер. Суворі розмежування у властивостях хвиль різних діапазонів при такому підході відсутні, а самі діапазони плавно переходять з одного в інший. Проте, такий підхід себе виправдовує завдяки чіткості і простоті. Розподіл хвиль по діапазонах і їх умовне найменування наводиться в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Діапазони радіохвиль

Смуга частот	Найменування діапазону частот	Смуга довжин хвиль	Найменування діапазону довжин хвиль	Застосування
Інфразвукові і звукові частоти				
3 – 30 кГц	Дуже низькі	100 – 10 км	Наддовгі (міріаметрові)	Узкополосний зв'язок через поглинаючі середовища. Радіонавігація.
30 – 300 кГц	Низькі (10 – 1 км	Довгі (кілометрові)	Радіонавігація, радіомовлення.
300 – 3000 кГц	Середні	1000 – 100 м	Середні (гектометрові)	Радіомовлення, радіозв'язок.
3 – 30 МГц	Високі	100 – 10 м	Короткі (декаметрові)	Радіомовлення, радіозв'язок.
30 – 300 МГц	Дуже високі	10 – 1 м	Ультракороткі (метрові)	Телебачення, радіомовлення, радіолокація.
300 – 3000 МГц	Ультрависокі	100 – 10 см	Ультракороткі (дециметрові)	Космічний зв'язок і навігація, телебачення, радіорелейні лінії зв'язку, радіолокація.
3 – 30 ГГц	Надвисокі	10 – 1 см	Сантиметрові	Радіолокація, наземний і космічний зв'язок, СВЧ нагрів.
30 – 300 ГГц	Вкрай високі	10 – 1 мм	Міліметрові	Ближня радіозв'язок, радіолокація, космічний зв'язок.
300 – 3000 ГГц	Гіпервисокі	1 – 0,1 мм	Субміліметрові	
Оптичний діапазон				

Так як атмосфера є основним середовищем, в якому розповсюджуються радіохвилі, то потрібно розглянути її структуру докладно.

Атмосфера Землі - це газоподібна оболонка, що оточує Землю. Атмосферою прийнято вважати ту область простору навколо Землі, в якій газоподібна середовище обертається з Землею як єдине ціле. Атмосфера має, мабуть, вторинне походження. Вона утворилася з газів, виділених твердою оболонкою Землі після сформування планети.

Земна атмосфера складається переважно з азоту N_2 та кислороду O_2 , містить також аргон Ar , вуглекислий газ CO_2 , неон Ne , водород H_2 , ксенон Xe , озон O_3 та інші гази. Своїм складом, таким чином, вона істотно відрізняється від атмосфер інших планет.

Атмосфера Землі складається з окремих шарів з умовно виділеними межами. Умовність полягає в тому, що ці кордони можуть змінюватися, середовища сусідніх шарів можуть проникати один в одного і перемішуватися. Нижній шар атмосфери до висоти 10-16 км, відлічуваної від поверхні Землі, називається тропосферою. У ній відбувається турбулентне перемішування газів; температура убуває з ростом висоти. Товщина тропосфери змінюється із земною широтою. У середніх широтах тропосфера простягається до висот 10-12 км; в екваторіальних - до 15-16 км; в полярних - до 7-10 км.

Над тропосферою розташовується стратосфера. Вона простягається до висот близько 50-60 км. У ній температура спочатку перестає спадати з висотою, а потім починає зростати. Над стратосферою знаходиться мезосфера, яка простягається до висот близько 90 км. У ній температура знову зменшується з висотою. Шар атмосфери, що займає по висоті інтервал 90-1000 км, називається термосферою. У ній температура зростає з висотою.

Термосфера вважається нижнім шаром іоносфери. Остання простягається від висот порядку 90 км до 20000 км. За своїм складом іоносфера якісно відрізняється

від нижніх шарів атмосфери вмістом в ній значної кількості вільних зарядів - електронів і іонів

Межі, на яких відбувається якісна зміна залежності температури від висоти, носять назви пауз. Так, в тропосфері на висоті близько 10 км знаходиться тропопауза, де температура перестає спадати з висотою. У стратосфері на висоті близько 48 км знаходиться стратопауза, де температура перестає зростати з висотою, В мезосфері на висоті близько 80 км розташовується мезопауза, де температура перестає спадати з висотою. Вертикальний розподіл температури визначає основні характеристики шаруватої структури атмосфери, зокрема, щільність і тиск, В зв'язку з тим, що щільність атмосфери в цілому зменшується з висотою, в тропосфері зосереджено приблизно 80% всієї маси атмосфери.

Всі структурні параметри атмосфери (температура, тиск, щільність) володіють значною просторово-часовою мінливістю. У зв'язку з цим вище була відзначена певна умовність розбиття атмосфери по висоті на шари.

2.2 Механізми поширення радіохвиль.

Існують наступні способи поширення радіохвиль: земні хвилі - це радіохвилі, що поширюються в безпосередній близькості від поверхні Землі. Іоносферні хвилі - радіохвилі, що поширюються на великі відстані в результаті однократного або багаторазового відбиття від іоносфери, а також радіохвилі, розсіюються на неоднорідностях іоносфери і відбиваються від іонізованих слідів метеорів. Тропосферні хвилі - радіохвилі, що поширюються на значні (до 1 000 км) відстані за рахунок розсіювання на неоднорідностях тропосфери. Прямі хвилі - радіохвилі, що поширюються в однорідному або слабонеоднородній середовищі, зокрема в космічному просторі, по прямолінійним (або близьким до них) траєкторіях.

При поширенні радіохвиль спостерігаються такі явища, як рефракція, дифракція, розсіювання, відбиття і заломлення.

При будь-якому способі поширення радіохвиль електричний сигнал, який переносить інформацію, накладається на високочастотне коливання генератора. Це

коливання випромінюється передавальною антеною в навколишній простір у вигляді радіохвилі. Радіохвиля, досягнувши точки прийому, впливає на приймальну антену, перетворюючи її енергію в електричний сигнал, з якого на виході тракту прийому виділяється корисна інформація

Дослідження показали, що при поширенні радіохвиль різні області вільного простору не однаково впливають на формування ЕМП у віддаленій від випромінювача точці прийому. При цьому завжди можна виділити область простору, через яку передається основна частина енергії радіохвиль. Розміри і конфігурацію цієї галузі легко визначити, скориставшись принципом Гюйгенса-Френеля: кожна точка фронту ЕМВ є вторинним джерелом нової сферичної хвилі. Якщо при цьому відомі положення фронту хвилі $S(t)$ і швидкість хвилі, то становище фронту в момент часу $(t + \Delta t)$ можна визначити поверхнею $S(t + \Delta t)$, проведеної за рівнем торкання до хвиль вторинних джерел.

Принцип Гюйгенса дає можливість описувати процес поширення електромагнітних хвиль лише з якісної точки зору і не дозволяє оцінити фізичні параметри хвиль кількісно. Френель висловив ідею про те, що хвилі вторинних джерел є когерентними і можуть інтерферувати. Отже, ЕМП в будь-якій точці простору можна визначити як результат інтерференції електромагнітних хвиль, випромінюваних всіма елементами Гюйгенса, розташованими на поверхні фронту хвилі первинного джерела. Об'єднані ідеї Гюйгенса і Френеля використовуються в сучасній фізиці і електродинаміці як принцип Гюйгенса-Френеля.

Радіопередача з однієї точки простору А в іншу В при певних умовах може бути здійснена шляхом, за допомогою так званої іоносферної (просторової) хвилі. Електрична неоднорідність верхніх іонізованих шарів атмосфери забезпечує механізм поширення радіохвиль з частотою до 30-40 МГц за рахунок послідовного багаторазового відбиття від іонізованих шарів атмосфери і поверхні Землі (Рисунок 2.2, б).

Розріджений газ іонізований, причому ступінь іонізації іоносферної плазми спочатку зростає з висотою (в так званій внутрішній іоносфері), потім убуває, а, як відомо, з ростом концентрації вільних електронів зменшується діелектрична

проникність середовища. В результаті внутрішня іоносфера являє собою матеріальну середу з вертикально падаючим показником заломлення.

Випромінювання антени А, що представляє собою поблизу нижньої межі іоносфери локально плоску хвилю, можна уявити променем, що падає на шар іоносфери під деяким кутом. Цей промінь зазнає рефракцію і може повернутися до Землі, як показано на рисунку 2.2, б, причому рефракція в іоносфері може чергуватися з відбиттям від земної поверхні. При багаторазовому перевідбитті від іоносфери і Землі радіохвилі поширюються на величезні відстані при порівняно малому поглинанні. Роль іоносфери дуже значна: вона утворює щось на зразок «природного дзеркала», яке спільно з земною поверхнею утворює іоносферний хвилевід. Однак при досить коротких хвилях (діапазон УКВ) іоносфера вже не грає ролі відбивача. Якщо промінь «не встигає» викривити у внутрішній іоносфері настільки, щоб за рахунок неоднорідностей повернути до Землі, він іде в зовнішню іоносферу, де концентрація заряджених частинок поступово падає. Ця обставина грає позитивну роль, оскільки саме завдяки зазначеній «прозорості» іоносфери виявляється можлива радіозв'язок з космічними об'єктами і радіоастрономія.

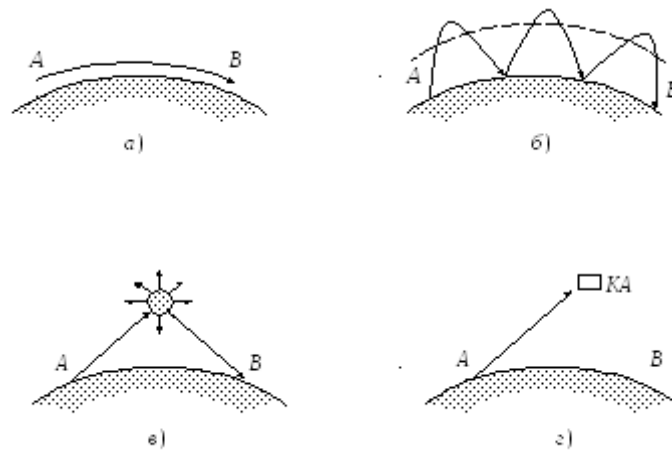


Рисунок 2.2 - Типи хвиль

Нижні шари атмосфери також впливають на поширення радіохвиль. У тропосфері, верхня межа якої лежить на висоті близько 15 км, зосереджено близько 80% всієї маси повітря. У тропосфері також відбувається рефракція, що виявляється на великих відстанях (рисунок 2.2, в). При поширенні радіохвилі в тропосфері

відбувається процес розсіювання, тобто перевипромінювання електромагнітного поля в неоднорідному середовищі за напрямками, відмінним від напрямку поширення первинного поля. Істотну роль при цьому відіграють випадкові неоднорідності тропосфери. За рахунок слабких електричних неоднорідностей локального характеру в атмосфері відбувається розсіювання радіохвиль. Розсіювання електромагнітних хвиль на неоднорідностях в тропосфері використовується для передачі інформації на частотах вище 300 МГц по наземним радіолінії. Механізм поширення хвилі в тропосфері називають далеким тропосферним поширенням.

Для таких діапазонів, як СДВ і ДВ, всі види ґрунтів (і, тим більше, водні середовища) виступають як провідники. Земна поверхня відображає ці хвилі без значного поглинання. Наддовгі і довгі хвилі неглибоко проникають в іоносферу. При малих частотах зміна діелектричної проникності плазми при зміні концентрації електронів є значним, так що нижня межа іоносфери виражена більш чітко. В результаті довгі хвилі поширюються між двома добре відбивають світло, як в волноводі.

Середні хвилі сильніше поглинаються ґрунтом і глибше проникають в іоносферу. Для пояснення їх поширення необхідно розглядати добовий режим стану іоносфери.

До діапазону КВ (декаметрові хвилі) відносять радіохвилі довжиною від 10 до 100 м (3 - 30 МГц). Декаметрові хвилі можуть поширюватися на тисячі кілометрів шляхом багаторазових відображень від іоносфери про Землі, і для цього не потрібні передавачі великої потужності. Діапазон КВ в основному використовується для побудови систем телекомунікації. Основні негативні особливості даного діапазону: обмеженість смуги частот за швидкістю передачі інформації, схильність іоносферних збурень, багатолучовість, глибокі завмирання і тд.

Верхня межа робочих частот КВ діапазону (максимальна застосовна частота (МПЧ)) залежить від довжини траси, висоти відображення, закону розподілу електронної щільності по висоті, критичної частоти шару. Нижня межа робочих

частот визначається тим, як зі зменшенням частоти збільшується поглинання в іоносфері, внаслідок чого зменшується напруженість поля. Значення найменшої застосовної частоти (НПЧ) залежить від поглинання, рівня перешкод, потужності випромінювання, стійкості застосовуваного сигналу і т.д.

При зміні стану іоносфери НПЧ і МПЧ змінюються, Для забезпечення безперервної дії КВ радіолінії необхідне коригування робочих частот.

У діапазонах КВ і УКВ прийом завжди супроводжується безперервним зміною рівня сигналу в часі, тобто завмиранням. Завмирання на КВ лініях має інтерференційне і поляризаційне походження, а також пов'язане зі зміною поглинання в іоносфері. Для підвищення стійкості роботи КВ лінії зв'язку при наявності замирання зазвичай використовують прийом на рознесені в просторі антени, а також антени з різною поляризацією.

Розрахунок КВ радіоліній зазвичай проводиться за наступною схемою:

- визначаються кути нахилу траєкторій і вимоги до характеристик спрямованості КВ антен,
- розраховується напруженість електричного поля,
- оцінюється вплив умов поширення на роботу радіолінії.

2.3 Особливості поширення радіохвиль різних діапазонів

Для загального розуміння, хвилі яких діапазонів поширюються як земні, тропосферні і іоносферні, наведемо тут загальні вказівки. Далі більш детально буде розглянуто особливості поширення кожного з діапазонів.

На близьких відстанях від передавача хвилі всіх діапазонів поширюються як земні.

Тропосфера впливає тільки на умови поширення радіохвиль коротше 10 м. Тому як тропосферні поширюються тільки метрові, дециметрові і сантиметрові хвилі.

Регулярні відображення від іоносфери відчувають хвилі довше 10 м. Тому як іоносферні можуть поширюватися лише хвилі діапазонів СДВ, ДВ, СВ і КВ. Однак

метрові хвилі теж можуть поширюватись як іоносферні - за рахунок розсіювання на неоднорідностях іоносфери і на метеорних слідах.

Нарешті, всі хвилі коротше 10 м, включаючи міліметрові і хвилі оптичних діапазонів, поширюються як прямі.

До діапазону ДВ (кілометрові хвилі) відносять радіохвилі довжиною 1000 ... 10000 м (частоти 300 ... 30 кГц). Довгі хвилі внаслідок відсутності поглинання Землею, яка практично є для них провідником, і великого дифракційного поля поширюється земної хвилею на порівняно великі відстані (при використанні професійного прийому). Однак вже на відстанях 1000 ... 2000 км поле іоносферної хвилі значно перевищує поле земної хвилі.

Як зазначалося вище, в діапазоні ДВ наближення геометричної оптики не виконується. Сучасні теорії поширення ДВ базуються на поширенні цих хвиль в сферичному хвилеводі, нижньою стінкою якого є поверхня Землі, а верхній - дном шар D, вночі шар E. Складність фізичних процесів при поширенні радіохвиль в такому хвилеводі обумовлена наступними причинами: сферичністю Землі і іоносфери; розмитістю і кінцевої провідністю нижньої межі іоносфери, її анізотропними властивостями за рахунок впливу магнітного поля Землі; кінцевої провідністю і складним рельєфом земної поверхні.

Волноводна теорія показує, що, як і в ідеальному хвилеводі, поле в точці прийому представляє результат інтерференції безлічі хвиль, що зазнали n -кратне відображення від стінок хвилеводу. Кожна-складова, яка називається парціальною хвилею, поширюється по похилій по відношенню до осі хвилеводу траєкторії. Кожній парціальної хвилі відповідає свій кут падіння θ^n на стінки хвилеводу. Від цього кута залежить коефіцієнт відбиття від стінок, тобто закон загасання хвилі.

Швидке загасання хвиль з високими номерами призводить до того, що зі збільшенням відстані все менше число мод виявляється істотним при формуванні поля в точці прийому. Структура поля в точці прийому залежить від часу доби. Вночі у формуванні поля бере участь більше число хвиль, ніж вдень, оскільки в темний час доби зникає шар і загасання всіх хвиль зменшується.

Необхідно відзначити ще одну особливість розподілу поля з відстанню, характерну для діапазону довгих хвиль. Вимірювання показують, що на відстані близько 20 000 км від випромінювача (точка антипода, що знаходиться на протилежному боці земної кулі) напруженість поля зростає. У антиподі амплітуда поля перевищує її значення в середині траси в 6 ... 7 разів. Теорія волноводного поширення підтверджує існування ефекту антипода в сферичному хвилеводі. Чисто якісно його можна пояснити як результат «стікання» в цю область хвиль, що приходять з різних напрямків, тобто хвилі, що огинають Землю, у антипода складаються в фазі.

Область застосування цих хвиль визначається особливостями їх поширення. Щодо мале загасання поля в тракті поширення і стійкість по відношенню до іоносферних збурень роблять раціональним використанням хвиль для зв'язку на далекі відстані, що тягнуться до антипода. Однак мала частотна ємність цього діапазону (всього 29,7 кГц) дозволяє застосовувати тільки телеграфні системи з малими швидкостями телеграфування (наприклад, робота ключем).

Поширення коротких хвиль. До діапазону КВ (декаметрові хвилі) відносять радіохвилі довжиною 10 ... 100 м (частоти 30 ... 3 МГц). Радіус дії земної хвилі в діапазоні КВ порівняно невеликий і при зазвичай використовуваних потужностях передавачів не перевищує декількох десятків кілометрів. Це обумовлено втратами в напівпровідничої поверхні Землі і великими втратами в процесі дифракції уздовж Землі.

Але декаметрові хвилі можуть поширюватися на багато тисяч кілометрів шляхом багаторазових послідовних відображень від іоносфери і Землі (малюнок?), і для цього не потрібні передавачі великої потужності. Це унікальна властивість діапазону КВ використовується для побудови систем телекомунікації. Крім радіозв'язку, декаметрові хвилі широко використовуються для радіомовлення та інших цілей.

Однак ряд несприятливих особливостей поширення знижує ефективність використання цього діапазону. До таких особливостей слід віднести: многолучевість, що супроводжується глибокими завмираннями; обмеженість

неспотвореної смуги передачі і швидкості телеграфування; схильність іоносферних збурень та ін.

Однією з основних особливостей КВ радіоліній є обмеження робочих частот як з боку високих, так і низьких значень, причому обидві кордону залежать від мінливої структури іоносфери. Тому на КВ лініях на відміну від ліній інших діапазонів виникає необхідність періодичної зміни робочих частот відповідно до умов, що змінюються станом іоносфери.

Верхня межа робочих частот визначається тим, що при дуже високій частоті хвиля не відбивається від іоносфери і не приходить в пункт прийому на Землі, а йде в космічний простір. Максимальна частота, при якій відбита хвиля може бути прийнята в заданому пункті прийому, називається максимальною прийнятною частотою (МПЧ).

Нижня межа робочих частот визначається тим, що зі зменшенням частоти збільшується поглинання в іоносфері (в освітлене час доби) і, як наслідок цього, зменшується напруженість поля. Якщо рівень сигналу в точці прийому впаде нижче певної норми, станеться вибух зв'язку. Найменша частота, при якій стійкість роботи знижується до мінімально допустимого рівня, називається найменшою прийнятною частотою (НПЧ). Значення НПЧ залежить від поглинання, рівня перешкод, потужності випромінювання, необхідної стійкості роботи і т. Д. Розрахунок НПЧ зводиться до визначення методом послідовності наближень частоти, на якій стійкість роботи зменшується до мінімально допустимого рівня при заданих параметрах приймально-передавальної апаратури.

Робоча частота вибирається в діапазоні НПЧ ... МПЧ. При зміні стану іоносфери НПЧ і МПЧ змінюються. Для забезпечення безперервної дії КВ радіоліній необхідна періодична зміна робочих частот. Для кожної радіолінії згідно з міжнародними правилами виділяється ряд фіксованих частот. Для протяжних магістральних ліній число таких частот досягає чотирьох-п'яти, а для менш відповідальних ліній - двох-трьох. На кожен місяць складається хвильовий розклад, яке встановлює, на яких з виділених частот слід працювати в різні години доби. Для підвищення ймовірності відбиття від іоносфери при флуктуаціях її параметрів

верхня межа робочих частот не обмежуватимуть МПЧ, а так званої оптимальної робочої частотою (ОРЧ). В середньому ОРЧ нижче МПЧ на 10 ... 20%.

Хвильовий розклад складається на основі залежностей ОРЧ і НПЧ від часу доби. У кожний період часу робота може вестися на будь-якій частоті не вище ОРЧ і не нижче НПЧ. З закріпленого набору частот для різних періодів доби вибираються частоти ближче до ОРЧ, так як при цьому вище стійкість роботи.

В діапазоні КХ, як і в інших діапазонах, прийом завжди супроводжується безперервними змінами рівня сигналу в часі, тобто завмираннями. Завмирання на КВ лініях мають інтерференційне і поляризаційне походження, а також пов'язані зі зміною поглинання в іоносфері.

Основними причинами інтерференційних завмирань є: інтерференція декількох хвиль, що зазнали різне число відображень від іоносфери; інтерференція розсіяних компонент хвилі; інтерференція звичайної (індекс «о») і незвичайною (індекс «х») складових хвилі.

Поляризаційні завмирання спостерігаються як при прийомі одного променя, так і при багатопроменевої структурі поля.

В діапазоні КХ інтерференційні і поляризаційні завмирання зазвичай протікають як швидкі; повільні завмирання приписують процесам повільних змін поглинання. На КВ радіолініях основні характеристики швидких завмирань (частота і глибина завмирань, масштаби просторової і частотної кореляцій та ін.) Істотно змінюються навіть протягом відносно коротких інтервалів часу.

Рознесений прийом. Для підвищення стійкості роботи КВ ліній зв'язку при наявності замирань зазвичай використовують прийом на рознесені антени і в деяких випадках - рознесення по поляризації. В діапазоні декаметрових хвиль в напрямку, перпендикулярному трасі, масштаб просторової кореляції завмирань становить (10 ... 15). Через обмеженість площі антенних полів відстань між двома приймальними антенами зазвичай вибирають близько 10.

Виграш в стійкості роботи, одержуваний за рахунок застосування рознесенного прийому, істотно залежить від статистичної структури поля. При інтерференційній структурі поля він значно більше, ніж при розсіяною.

Крім випадкових змін амплітуди поля на КВ радіолініях завжди мають місце частотно-селективні завмирання, при яких виникають спотворення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) в межах переданої смуги частот. Залежно від структури поля в точці прийому і вимог до рівномірності АЧХ сигналу неспотворена смуга передачі характеризується значеннями від 100 Гц до 3 кГц. У порівнянні з діапазоном УКХ тракт розповсюдження коротких хвиль значно більш вузькосмуговий.

2.4 Поширення УКХ

До діапазону УКХ відносять радіохвилі довжиною від 0,1 мм до 10 м (частоти від 30 МГц до 3000 ГГц). Характерною особливістю цього діапазону є його велика частотна ємність, що дозволяє передавати широкосмуговий інформацію.

Ультракороткі хвилі широко застосовуються в наземних системах зв'язку і мовлення. Більшість таких систем працює на земній хвилі. Виняток становлять лише лінії зв'язку, що працюють на хвилях, розсіяних в атмосфері.

У розглянутому діапазоні хвиль стійка робота на земній хвилі обмежена відстанню прямої видимості (десятки кілометрів). Для передачі інформації на відстані в сотні і тисячі кілометрів використовують радіорелейні лінії (РРЛ) з інтервалами в межах прямої видимості.

Системи телевізійного та звукового мовлення працюють на хвилях метрового і дециметрового діапазонів. Стійкий радіус дії мовних передавачів в цих діапазонах також обмежений відстанню порядку прямої видимості. Для збільшення радіусу дії станцій намагаються піднімати антену на передачу по можливості вище за рахунок як природного рельєфу місцевості, так і вежі, на якій встановлюється антена.

Дальнє тропосферне поширення УКХ.

Вище було показано, що механізм ДТР є результат розсіювання радіохвиль на слабких неоднородностях діелектричної проникності тропосфери. Властивості механізму такі, що ДТР використовують тільки для систем радіозв'язку (для систем радіомовлення і телебачення цей механізм непридатний).

На тропосферних радіорелейних лініях (ТРРЛ) пункти прийому завжди розташовуються в зоні глибокої тіні. Протяжність інтервалів між сусідніми станціями складає в різних випадках 150 ... 1000 км. Основне застосування ТРРЛ знаходять в важкодоступних північних і гірських районах, де їх будівництво і експлуатація значно вигідніше, ніж звичайних РРЛ з інтервалами прямої видимості.

На тропосферних лініях прийом супроводжується глибокими загальними і селективними завмираннями, що пояснюється флуктурує многолучевою структурою прийнятого розсіяного поля. Частотно-селективні властивості завмирань є причиною спотворення сигналів і обмеження неспотвореної смуги передачі інформації. Лінії ТРРЛ використовуються в основному для передачі телефонних і телеграфних сигналів.

Особливістю ліній ДТР є швидке убування рівня сигналу зі збільшенням довжини радіолінії, що пояснюється двома причинами. Найбільша інтенсивність розсіюють неоднорідностей спостерігається в нижніх товщах тропосфери, тому на лініях ДТР незалежно від довжини інтервалу випромінювання і прийом ведуть приблизно під нульовим кутом до горизонту.

Поширення УКХ на космічних радіолініях. Широке застосування знаходять радіолінії великої протяжності, на яких обмін інформацією між кінцевими пунктами ведеться за допомогою ретрансляційні станції, встановленої на ШСЗ. Робота йде за схемою Земля-ШСЗ-Земля. Самостійне значення мають також

Радіолінії Земля - ШСЗ для передачі інформації на супутник і лінії ШСЗ-Земля для прийому інформації із супутника. Всі згадані радіолінії відносяться до класу космічних. Умови роботи космічних ліній мають ряд особливостей, які необхідно враховувати при вивченні процесів поширення радіохвиль.

Оптимальні висоти польоту зв'язкових ШСЗ лежать в межах 10000 ... 40000 км над поверхнею Землі. Таке розташування бортових ретрансляторів призводить до необхідності використовувати на космічних лініях хвилі з частотами вище 100 МГц (3 м), що не відбиваються від іоносфери.

Більшість внутрішніх і міжнародних супутникових ліній зв'язку в даний час працюють в смугах 6/4 і 8/7 ГГц (чисельник відповідає смузі частот на ділянці лінії

Земля-ШСЗ, знаменник - ШСЗ-Земля). У більш високих частотних діапазонах виділені смуги 14/12 і 30/20 ГГц.

Основні явища, що супроводжують поширення радіохвиль таких частот, зводяться до загасання в атмосферних газах і опадах, зміни поляризації хвиль за рахунок ефекту Фарадея і опадів, випадковим флуктуацій амплітуди і фази прийнятого поля, варіацій кутів приходу, обмеження смуги частот, що передається без спотворень.

При русі ШСЗ по будь орбіті, крім геостаціонарній (екваторіальна кругова орбіта з висотою = 35860 км), відбувається переміщення ШСЗ щодо земних пунктів передачі та прийому. При цьому змінюються кут піднесення траєкторії поширення хвилі відносно лінії горизонту і довжина шляху, що проходить хвилею в атмосфері. Нижче показано, що при малих кутах піднесення умови поширення значно погіршуються. Тому супутникові лінії зв'язку працюють тільки при кутах $\varphi > 5^\circ$. При проектуванні таких ліній повинні враховуватися умови, що змінюються поширення при переміщенні супутника в секторі кутів підвищення від 5° до 90° .

Переміщення супутника щодо наземної станції обумовлюють прийом, що супроводжується ефектом Доплера. Доплерівське зміщення частоти є причиною спотворення спектра сигналу.

Високі вимоги до стійкості роботи супутникових систем зв'язку роблять необхідним ретельне вивчення умов поширення на лінії.

3 РОЗВИТОК ТЕХНІКИ МІЛІМЕТРОВИХ І СУБМІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ

3.1 Види загасання радіохвиль міліметрового діапазону

Розглянемо особливості поширення і застосування міліметрових (мм) і субміліметрових (субмм) хвиль.

В останні роки одним з найважливіших напрямків розвитку комерційної і військової СВЧ-радіоелектроніки стало просування в область міліметрового і субміліметрового діапазонів хвиль.

Відповідно до прийнятої класифікації діапазонів хвиль до міліметровому діапазону відносяться радіохвилі області частот котрих 30-300 ГГц, до субміліметрового, або дециміліметрового, відносяться радіохвилі області частот 300-3000 ГГц.

Зазвичай при розподілі всієї області електромагнітних хвиль на діапазони враховуються відмінності у фізичному проходженні, особливості поширення, способи генерації і прийому. Однак чітких фізичних кордонів між діапазонами не існує, вони є в значній мірі умовним.

У деяких джерелах науково-технічної літератури використовується термін «діапазон ближніх міліметрових хвиль (діапазон БММХ)», який охоплює хвилі довжиною від 0,3 до 3,0 мм, тобто частотний діапазон від 100 ГГц до 1 ТГц.

Оскільки на практиці часто широко використовується діапазон частот, що лежить в околиці частоти 94 ГГц, то частоти 90-100 ГГц зазвичай також відносять до діапазону БММХ.

Міліметрові і дециміліметрові хвилі займають проміжне положення між радіохвилями сантиметрового діапазону і інфрачервоним випромінюванням 3-400 ГГц. Кордон між діапазонами радіохвиль і хвиль інфрачервоного випромінювання виражена нечітко. Однак техніка генерації і прийому міліметрових і

дециміліметрові хвилі в застосовуваних в даний час способи ближче до радіотехніки, ніж до інфрачервоної техніки.

Інтенсивне освоєння діапазонів міліметрових і більш коротких хвилі в останні роки пов'язано з різким зростанням числа радіоелектронних пристроїв і систем, в зв'язку з чим стала відчуватися нестача вільних частот в діапазоні менш 30 ГГц ($\lambda < 1$ см). Інтерес до цих діапазонів обумовлений і поруч особливих властивостей міліметрових хвилі, що відрізняють їх від хвилі сантиметрового діапазону:

- зменшення масогабаритних характеристик пристроїв і систем, зокрема зменшення розмірів антен радіолокаційних станцій; можливість розміщення на ракетах і рухомих засобах;

- розширення смуги частот і можливість збільшення інформативної ємності каналів зв'язку;

- поліпшення діаграм спрямованості антен, велика роздільна здатність, можливість виявлення малих об'єктів;

- краще проникнення через пил і туман, ніж в оптичному діапазоні та при випромінюванні більш довгохвильових СВЧ-коливань;

- збільшення перешкодозахищеності ліній зв'язку, мінімальні можливості підслуховування;

- менше загасання при проходженні через іонізовану середу в порівнянні з хвилями сантиметрового і дециметрового діапазонів;

- велика зміна поглинання в атмосфері при відносно малій зміні частоти.

Слід особливо відзначити, що інтерес до діапазону коротких міліметрових хвилі в значній мірі обумовлений складнощами, з якими зіткнулися при використанні оптичних хвилі. Інфрачервоні системи, здатні працювати як в денних, так і в нічних умовах, часто виявляються неефективними при наявності на трасі поширення хвилі хмарності, туману або диму. У той же час випромінювання ближнього міліметрового діапазону здатне проникати через такі замутинені області та забезпечувати достатню дозвіл по дальності і кутах.

Вибір робочих частот в діапазонах міліметрових і субміліметрових хвиль вирішальним чином визначається умовами і характеристиками поширення цих хвиль в атмосфері. У цій області помітно зростає загасання в атмосфері через молекулярного поглинання, яке мало позначається в діапазоні сантиметрових хвиль. Поглинання в діапазоні міліметрових хвиль обумовлено головним чином взаємодією з молекулами O_2 і водяної пари H_2O . Для молекул O_2 характерною наявністю магнітного моменту, для H_2O - електричного. Взаємодія електромагнітної хвилі з магнітним моментом молекул O_2 призводить до появи низки ліній поглинання в області поблизу 60 ГГц, а також лінії 118,8 ГГц. Аналогічно водяні пари створюють лінії поглинання на частотах 22,2 та 183,3 ГГц, а також на більш високих частотах. На рис. 1.2 наведені характеристики поглинання в парах води і молекулярному кисні в залежності від частоти.

Перший максимум загасання (близько 20 дБ / км) знаходиться на частоті 60 ГГц. Поряд з піками загасання є ряд смуг (вікон) прозорості, в тому числі на частоті 94 ГГц (загасання складає близько 0,6 дБ / км), 140-150 ГГц (загасання близько 2 дБ / км), 230-240 ГГц (близько 7 дБ / км), 500 ГГц (близько 10 дБ / км). Далі вгору по частоті загасання зростає до значення близько 1000 дБ / км до інфрачервоної області, а потім, проходячи через кілька максимумів і мінімумів в короткохвильової частини, падає в області видимого світла до величини 0,05 дБ / км

Важливими умовами поширення міліметрових і субміліметрових хвиль є атмосферні явища, такі як дощ різної інтенсивності, туман, сніг і пил. Вплив дощу і туману ілюструють криві на рис. 3.1.

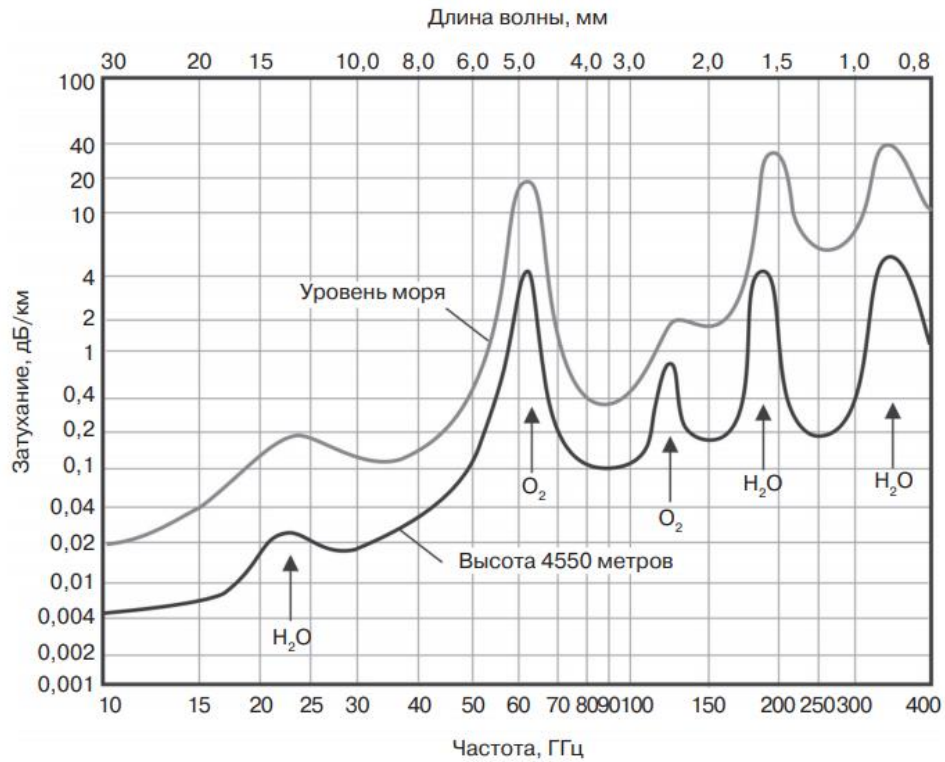


Рисунок 3.1 - Усреднене поглинання атмосферою міліметрових хвиль при горизонтальному поширенні

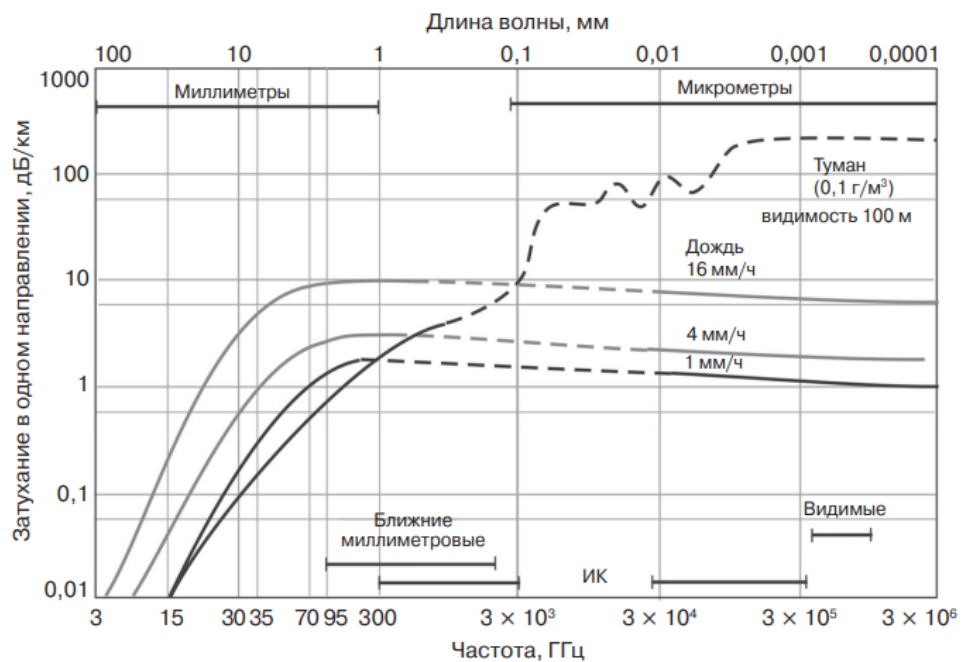


Рисунок 3.2 - Вплив дощу і туману на поширення міліметрових і субміліметрових хвиль

Зазначені вище особливості міліметрових і субміліметрових хвиль, а також успіхи і досягнення в галузі електроніки та мікроелектронної технології, що

дозволили, незважаючи на значні технологічні труднощі, створити досить надійні напівпровідникові та інші компоненти цього діапазону з ідентичними параметрами і характеристиками (джерела потужності, детекторні-змішувальні, керуючі, розв'язують пристрої, різні елементи СВЧ-тракту: ответвители, фазовращатели, перемикачі, атенюатори і т.п.), призвели до того, що багато систем і прилади міліметрового діапазону хвиль в даний час переходять зі стадії розробки в стадію виробництва. Усе більш очевидною стає тенденція освоєння і практичного використання короткохвильової частини міліметрового ($f \geq 75$ ГГц) діапазону.

Основні напрямки розробок в міліметровому діапазоні хвиль пов'язані зі створенням різноманітних систем і апаратури, перш за все військового, а також наукового і промислового призначення.

3.2 Области застосування міліметрових і субміліметрових хвиль в науці і техніці і основні напрямки розробок

Основними областями застосування міліметрових і субміліметрових хвиль в науці і техніці є:

- радіолокація;
- радіонавігація;
- радіозв'язок;
- радіоуправління;
- радіопротидія;
- радіоастрономія;
- радіометр;
- медицина;
- атмосферна метеорологія;
- засоби обчислювальної техніки;
- моделювання радіотехнічних систем;
- наукові дослідження різних напрямків.

Для сучасної радіоелектроніки, що є розвиненою галуззю техніки, характерна наявність і розробка великого числа радіосистем, істотно розрізняються за своїм призначенням, принципом дії, використовуваному діапазону частот, складності, вартості, масою і габаритами, масовості виробництва і т.д. При цьому під радіосистемою розуміють будь-яку технічну систему, в якій основна функція виконується радіоелектронними засобами.

У свою чергу, відповідно до призначення системи ділять на ряд категорій: системи радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, радіоуправління, радіотелеметрії, радіонаведення, радіопротидії і ін. Основними складовими частинами будь-якої радіосистеми є радіопередаючі, радіоприймальні, антенно-фідерні пристрої, а також пристрої харчування, відображення інформації, електронно-обчислювальні машини та ін.

У радіопередавальному пристрої будь-якої системи здійснюється модуляція закодованим повідомленням коливань несучої частоти, в якості яких останнім часом все ширше використовуються коливання міліметрових і субміліметрових хвиль. Відповідно, з використанням трактів міліметрового діапазону і його елементів будуються приймальні та антенно-фідерні пристрої, а системи в цілому ставляться до систем міліметрового і субміліметрового діапазонів хвиль.

За радіосистемами різного призначення в нормативно-законодавчому порядку закріплюються ті чи інші кращі ділянки частотних діапазонів.

До числа основних радіосистем міліметрового діапазону, розробка яких активно проводиться в останні роки багатьма підприємствами і фірмами перш всього Росії і США, відносяться:

- радіолокаційні станції (РЛС) з високою роздільною здатністю, в тому числі РЛС розпізнавання і локації космічних об'єктів з Землі і із супутників, РЛС виявлення і супроводу низько цілей для зенітно-ракетних комплексів (ЗРК) і кораблів, бортові літакові РЛС і ін .;

- різні системи зв'язку, в тому числі зв'язок «Земля-космос», межспутникових зв'язок (наприклад, на частотах в області 60 ГГц, внаслідок наявності піку в атмосфері до 20 дБ / км в космосі може бути забезпечена далекий зв'язок між

спутниками, прихована від наземних спостережень), системи наддалекої зв'язку, прихована оперативно-тактична зв'язок на дальність до 5-8 км, знову-таки на частотах смуг непрозорості та ін .;

- кошти наведення, в тому числі системи активного і пасивного наведення ракет, головки самонаведення реактивних снарядів і т.п .;

- радіонавігаційні системи різного призначення, в тому числі літакові, супутникові, морські та ін., Які охоплюють навігацію і упізнання;

- системи радіопротидії, використовувані в електронній розвідці, зв'язковою, сигнальної радіорозвідки і т.п .;

- ряд інших систем, включаючи системи управління і контролю

Однією з важливих областей застосування міліметрових і субміліметрових хвиль є моделювання.

Для кращого уявлення і досліджень властивостей розроблюваних РЛС характеристик відображення детектируємих цілей створюються лабораторні моделі, що працюють на істотно більш високих частотах, ніж самі станції. При цьому моделюються цілі зменшуються у відповідному масштабі. Звичайні значення коефіцієнтів зменшення знаходяться в межах від 1/ 4 до 1/ 20 для літаків і від 1/ 100 до 1/ 200 - для кораблів. Так як найбільш поширеними робочими частотами РЛС є частоти від 3 до 10 ГГц, моделі РЛС розробляються для частот від 10 до 200 ГГц (мається повідомлення про розробку такої моделі на частоті 890 ГГц).

Широкі перспективи подальших робіт пов'язані із застосуванням міліметрових і субміліметрових хвиль в наукових дослідженнях, для зондування атмосфери в метеорології, медицині, радіоастрономії і інших областях.

Так, в останні роки значно активізувалися радіоастрономічні дослідження, що дозволяють отримати відомості не тільки про розподіл джерел радіовипромінювання в просторі, але і про їх фізичну природу. Дослідження простягаються тепер і в область субміліметрових хвиль. Проблеми, пов'язані з ослабленням сигналів в атмосфері, долаються завдяки використанню космічних пристроїв (винесення радіотелескопів за межі атмосфери на супутниках, космічних станціях і т.п.).

В даний час вже зареєстровані екстрагалактичні джерела в субміліметровому діапазоні на хвилях довжиною 1 мм, 350 і 100 мкм. Розвитку досліджень в цій області сприяло створення спеціальних чутливих радіометрів.

Великих успіхів досягнуто в радіоспектроскопії міліметрового і субміліметрового діапазонів, в тому числі в частині створення апаратури, призначеної для вивчення спектрів поглинання. Проводяться дослідження взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, що знаходиться в газоподібному, рідкому і твердому станах. Досліджуються такі матеріали, як германій, кремній, арсенід галію і т.д.

3.3 Лінії передачі міліметрових і субміліметрових хвиль

Розробки різних систем і апаратури, тобто практичне використання коротких міліметрових і субміліметрових хвиль, вимагають створення хвилеводних систем і різних елементів, що входять в хвилеводний тракт, пристосованих для ефективної роботи в цих частотних діапазонах. Таким роботам в США, Росії, Японії та інших країнах приділяється серйозна увага.

В якості основного хвилеводного тракту систем міліметрового діапазону за кордоном, наприклад в США, в діапазоні частот до 325 ГГц використовуються порожнисті металеві одномодові хвилеводи прямокутних перетинів.

У діапазонах міліметрових і субміліметрових хвиль поруч із порожніми металевими хвилеводами прямокутного і циліндричного перетинів, в яких поширюються хвилі одного типу, при вирішенні різноманітних завдань застосовують і хвилеводи інших типів, зокрема хвилеводи збільшеного перетина (надрозмірні), желобкові хвилеводи, різного типу мікрополоскових лінії, діелектричні, променеві та інші хвилеводи.

Формули для основного H₁₀ (TE₁₀) типу хвилі прямокутного хвилеводу:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{f}{c}\right)^2 - \left(\frac{1}{2a}\right)^2}}, \quad (3.1)$$

де Λ - довжина хвилі в хвилеводі основний моди; λ - довжина хвилі у вільному просторі; f - частота (Гц); c - швидкість світла у вільному просторі; a - розмір широкі стінки хвилеводу.

$$f_{\text{кр}(H_{10})} = \frac{c}{2a} \text{ или } f_{\text{кр}(H_{10})} = \frac{149,9}{a} (\text{ГГц}), \quad (3.2)$$

Де $f_{\text{кр}(H_{10})}$ - критична частота (або частота зрізу) основного типу хвилі.

$$\alpha = 2,3273 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \frac{1}{b\sqrt{a}} \frac{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + \frac{2b}{a}}{\sqrt{\frac{f}{f_c} \sqrt{\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 - 1}}} (\text{дБ/м}), \quad (3.3)$$

де α - загасання в прямокутному хвилеводі; ρ - питомий опір внутрішньої немагнітної металеві стінки; ρ_0 - питомий опір міді = $1,7241 \cdot 10^{-8}$ Ом/м; a - внутрішня ширина хвилеводу (мм); b - внутрішня висота хвилеводу (мм); f_c - критична частота, яка визначається виразом (1.2); f - частота, на якій розраховується загасання.

$$P_{\text{пред}} = \frac{abE_{\text{пред}}^2}{1,51} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} (\text{кВт}), \quad (3.4)$$

де $P_{\text{пред}}$ - гранична потужність хвилеводу; $E_{\text{пред}} = 29$ кВ/см (для кисню).

При переході к коротким хвилям властивості одномодових хвилеводів погіршуються: розміри зменшуються, посилюються допуски на розміри, а втрати зростають. На довжині хвилі 1 мм втрати в прямокутному хвилеводі, в якому поширюється хвиля H_{10} , перевищують 20 дБ / м. При зменшенні довжини хвилі втрати швидко ростуть.

На рис. 3.3 представлені частотні залежності типових значень втрат стандартних хвильоводів США (від WR-28 до WR-3).

У технічно обґрунтованих випадках допускається застосування хвильоводів в діапазоні частот (1,25-1,90) $f_{кр}(H10)$.

Практична реалізація хвильоводних пристроїв з перетином хвильоводу менш ніж $1,6 \times 0,8$ або $1,3 \times 0,65$ мм стає складним завданням через збільшення втрат в них, істотного зменшення всіх лінійних розмірів і необхідності значного посилення допусків на них. Серйозною проблемою для цих перетинів хвильоводів стає забезпечення надійних фланцевих з'єднань без перекосів і зсувів апертур з'єднуючих хвильоводів, що істотно позначається на параметрах вимірювального тракту.

Деяке практичне використання знаходять хвильоводи збільшених перетинів, в яких можуть існувати коливання вищих типів. Втрати в них значно нижче. Так, при $\lambda = 0,8$ мм загасання в волноводі перетином $7,2 \times 3,4$ мм складає 1,4 дБ / м, а при $\lambda = 0,65$ мм загасання в хвильоводі перетином 23×10 мм одно 1,65 дБ / м.

У розглянутих діапазонах запропоновані і досліджуються також хвильоводи інших типів, наприклад Н-хвильоводи, желобкові (з виїмками уздовж широких стінок). Вивчаються різні варіанти діелектричних хвильоводів, проте втрати в таких хвильоводах досить високі. На рис. 3.3 наводяться частотні залежності втрат в стандартних хвильоводах.

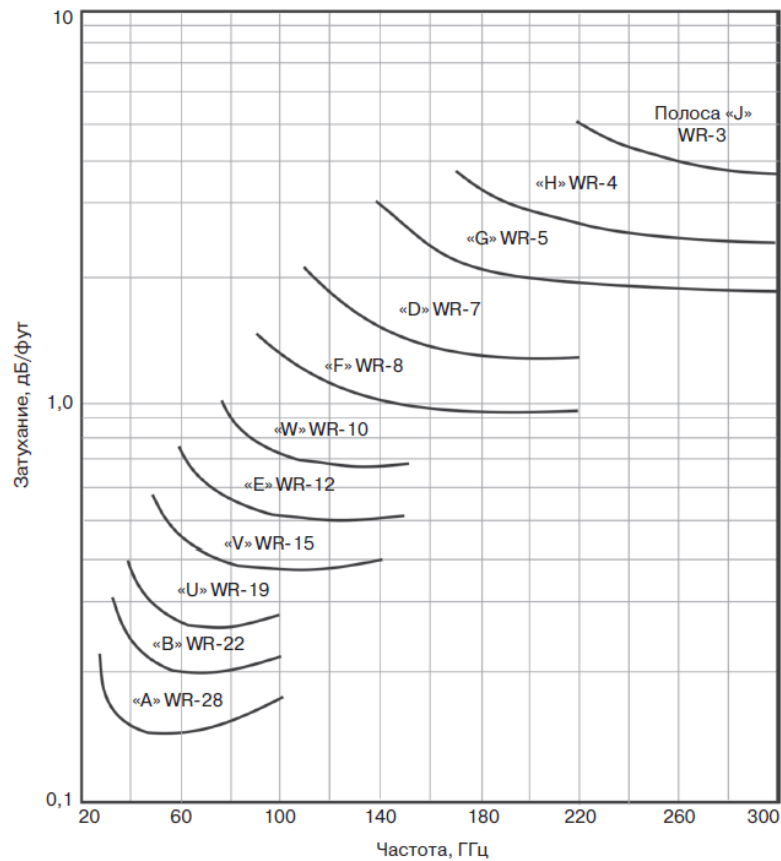


Рисунок 3.3 - Частотні залежності втрат в стандартних хвильоводах

Неможливість створення хвильоводів з низькими втратами привела свого часу до використання в субміліметровому діапазоні хвиль квазиоптичної техніки. Знаходять деяке застосування променеві хвильоводи з лінзами і дзеркалами. До їх недоліків відносяться порівняно високий рівень втрат і необхідність ретельної юстування дзеркал.

Як показав ряд проведених досліджень, найкращим для використання в апаратурі і різних системах короткохвильової частини міліметрового і субміліметрового діапазону (понад 150 ГГц) представляється металодіелектричних надрозмірні хвильовід.

3.4 Мікростільникові і пікостільникові лінії зв'язку в місті

В останні роки в найбільш розвинених країнах світу спостерігається величезний прогрес і конкурентна боротьба фірм в розробці нових систем зв'язку в

міських умовах і сільській місцевості між рухомими і стаціонарними об'єктами. Це стало можливим завдяки успіхам в твердотільній електроніці, мікроелектроніці, фотоніці, акустoeлектроніці, а також в розробці систем зв'язку на УКХ із застосуванням синхронних і низькоорбітальних штучних супутників Землі.

Поява технологій WiGig і нового стандарту бездротової передачі інформації IEEE 802.11ad в 2012 р було продиктовано необхідністю значного підвищення швидкості передачі мультимедійної інформації і широким впровадженням технологій високоякісного відтворення відеоінформації з високою роздільною здатністю (HDTV, UHD). Використання діапазону 60 ГГц дозволяло істотно розширити смугу пропускання каналу зв'язку до 2 ГГц. Високі швидкості передачі інформації за технологією WiGig досягалися всередині приміщень на невеликих відстанях (в межах 10-15 м), що було досить, наприклад, для технологій віртуальної або доповненої реальності (VR / AR) [2].

Однак сценарії розгортання систем зв'язку наступного покоління 5G показують [3,4], що діапазон частот 60 ГГц пропонується використовувати не тільки для розгортання персональних мереж WPAN (Wireless Personal Area Network), але і для створення малих сот SC (Small Cell), що дозволить збільшити швидкість інформації в сегменті обслуговування мобільних абонентів в зоні щільної міської забудови та розширити можливості тих-нологій інтернету речей IoT (Internet of Things), що вимагають підключення великої кількості пристроїв до бездротової технології [5].

На відміну від сантиметрового діапазону хвиль, де зараз впроваджуються бездротові мережі 4G [6,7], використання міліметрового діапазону хвиль (ММ ДВ), забезпечує більш високі швидкості передачі інформації за рахунок формування вузьких сигнальних променів, високої посилення антен при малій їх апертурі і підвищення перешкодозахищеність каналу зв'язку. Однак суттєвим недоліком при цьому є велика загасання радіосигналу в атмосферних газах, гідрометеорах і наявністю деяких інших видів додаткових втрат [8, 9].

Міжнародна організація ІТУ розробила і запропонувала рекомендації [10,11] для розрахунку можливих послаблень сигналу при застосуванні сучасних систем

зв'язку в ММ ДХ в різних кліматичних зонах. Для уточнення статистичних даних у багатьох країнах, в тому числі і в країнах східної Європи (Польща, Болгарія Угорщина та ін.), Проводяться додаткові дослідження особливостей локального мікроклімату і його впливу на ефективність розгортання і готовність каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль при тривалій експлуатації [12 , 13].

Один з можливих сценаріїв розгортання мережі 5G в умовах щільної міської забудови представлений на рис. 3.4. В районі міста одночасно працюють і взаємодіють-ють між собою кілька малих сот SC: макро-стілники (Macro-Cell) - радіусом дії (1-2 км); мікро-стілники (Micro-Cell) - радіусом дії (0,5-1 км); піко-стілники (Pico-Cell) - радіусом дії (0,1-0,5 км).

Неліцензований діапазон 60 ГГц, з великим загасанням сигналу в атмосфері, дає можливість повторно використовувати виділені для провайдера частотні канали, а технології масивів МІМО для формування вузьких променів на базових станціях (BS) і точках доступу (AP), істотно знижують внутрісистемні перешкоди. У цьому випадку завдання частотного планування для побудови малих сот стає не такою актуальною.

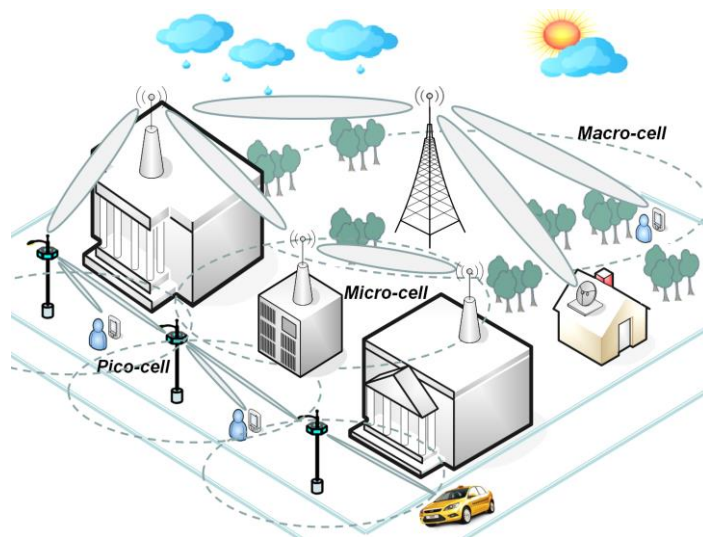


Рисунок 3.4 - Сценарій розгортання мереж 5G на основі малих сот (Small Cell).

Особливістю сценарію також є застосування ММ ДВ, як для побудови елементів транспортної мережі (Backhaul link), так і ліній абонентського доступу (Access link) для терміналів користувачів D (Device) і пристроїв IoT (рис. 3.5.).

Частотний 60 ГГц визнаний неліцензійним і його частотний розподіл представлено в табл. 3.1 для різних регіонів і країн світу [14].

Таблиця 3.1

Параметр	Країни і 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 передавача, dBm	-	10	10	10	27
еквівалентна ізотропна	40 середня 43 пікова	57	57	51,8	40 середня 43 пікова

Одним з параметрів наведеним в табл. 3.1 вказана еквівалентна ізотропна потужність в антені EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power), яка є інтегральною енергетичною характеристикою передавача, що враховує спрямовані властивості антени. Формула показує, що малопотужний радіопередавач з спрямованої антеною може створювати в деякому напрямку такий же рівень радіовипромінювання, що і потужний радіопередавач з слабонаправлених антеною.

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX} \quad [dBm] \quad (3.5)$$

де: P_{TX} – потужність передавача, dBm; G_{TX} – коефіцієнт посилення передавальної антени dBi.

Для визначення пропускну здатності каналу зв'язку, необхідно провести детальну оцінку бюджету радіолінії довжиною, що враховує потужність передавача, ослаблення сигналу 60 ГГц на трасі, ослаблення за рахунок наявності кисню в атмосфері, вплив опадів у вигляді дощу і посилення приймальної антени G_{RX} . НарПис. 3.5. наведені основні сценарії використання діапазону 60 ГГц для різних сегментів мережі в умовах міської забудови

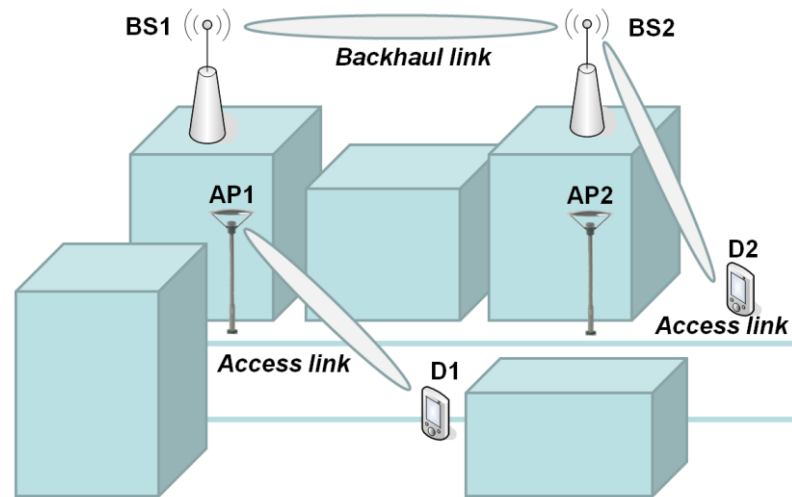


Рисунок 3.5. Основні сценарії використання діапазону 60 ГГц для різних сегментів мережі в умовах міської забудови

Потужність сигналу в приймачі P_{RX} можна представити у вигляді:

$$P_{dB}^{RX}(d) = P_{TX} + G_{TX} - PL(d) - O(d) - R(d) + G_{RX} \quad [dB] \quad (3.6)$$

В умовах міської забудови для представлених на рис. 3.5 сегментів радіомережі можна використовувати дві основні моделі для розрахунку ослаблення сигналу 60 ГГц на трасі: модель прямої видимості (LOS) і модель вуличного каньйону (Street Canyon) [15, 16]:

$$PL(d)_{LOS} = 32,5 + 20\log_{10}(f) + 10n\log_{10}(d/1000) \quad [dB] \quad (3.7)$$

$$PL(d)_{SC} = 82,02 + 10n\log_{10}(d/d_0) \Big|_{d_0=5} \quad [dB] \quad (3.8)$$

де: f – частота сигналу в ГГц; n – коефіцієнт, що залежить від умов поширення сигналу (2...6) [15]: $n=2$ для сценарію LOS; $n=3-5$ для сценарію Street Canyon; d – відстань між передавальною і приймальною антенами, м; d_0 – еталонна відстань, $d_0 = 5$ м.

У таблиці 3.2 представлені величини коефіцієнта для різних умов поширення.

Таблиця - 3.2

умови розповсюдження	n
Вільний простір	2
Відкритий простір в місті	2,7-3,5
Простір в місті з щільною забудовою	3-5
Всередині будівель LOS	1,76-1,8
Всередині будівель NLOS	4-6

При розрахунку бюджету радіолінії ММ ДХ довжиною понад 100 м необхідно враховувати загасання в атмосферних газах (тобто поглинання в атмосферному кисні O₂) і загасання в залежності від інтенсивності опадів.

Рівень поглинання в атмосферному кисні необхідно враховувати на радіотрасах довжиною понад 400 м і на частоті 60 ГГц складає [17]. Для відстані між передавальної і приймальної антенами в метровій шкалі.

Фактори загасання в дощах залежать від дощової кліматичної зони і реєструються Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) [18]. Територія України розташована в трьох кліматичних зонах по інтенсивності опадів (рис. 3.6).

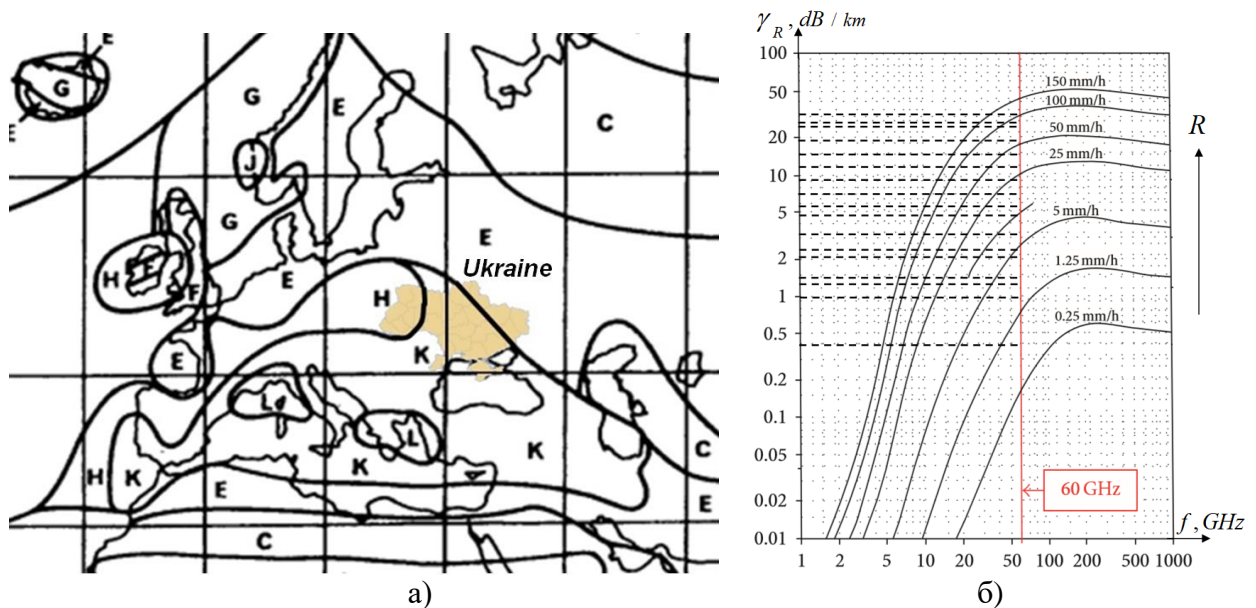


Рисунок 3.6 Розташування України в трьох кліматичних зонах ІТУ (а) і залежність погонного загасання від частоти сигналу і інтенсивності опадів (б)

Дані ІТУ інтенсивності опадів за кліматичними зонами представлені в табл. 4.

$$R(d) = \gamma_R \cdot d / 1000 \text{ [dB/m]} \quad (3.9)$$

Величину погонного загасання сигналу 60 ГГц в дощі γ_R , в залежності від інтенсивності опадів R [мм / год], можна визначити, використовуючи графіки, представлені на рис. 3.6.б [19]. На графіку пунктиром показані рівні загасання γ_R [дБ / км] в дощі.

Інтенсивність опадів, наявність хмар і інші локальні метеорологічні чинники атмосфери в ММ ДВ 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 [20].

У табл. 4 вказані чисельні значення рівнів загасання 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 величину посилення приймальної антени G_{RX} рівній коефіцієнту посилення передавальної антени G_{TX} .

Тоді

$$G_{RX} = G_{TX} = EIRP - P_{TX} = 43 - 27 = 16 \quad [dBi] \quad (3.10)$$

Ці вирази дозволяють розрахувати бюджет радіолінії в залежності від відстані d_{TX-RX} для різних кліматичних зон, сценаріїв розгортання, відсотки готовності лінії зв'язку AR.

Таблиця – 3.3

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

Граничну пропускну здатність каналу зв'язку в залежності від відстані d_{TX-RX} між передавачем і приймачем, смуги пропускання і співвідношення сигнал / шум, можна оцінити виходячи з формули К.Шеннона [20]:

$$C(d) = BW_{60GHz} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_W^{RX}(d)}{N_W} \right) \quad [бит/сек] \quad (3.11)$$

де: BW – ширина полоси пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц ($BW = 2.16 \cdot 10^9$ Гц); $P_W^{RX}(d)$ – потужність сигналу на вході приймача в Вт на відстані d від передавача ($P_W^{RX}(d) = 10^{(P_{dB}^{RX}(d)/10)}$); N_W – потужність шуму в Вт $N_W = 10^{(N_{dB}/10)}$.

Потужність шуму залежить від різних чинників: діапазону частот, смуги пропускання каналу радіозв'язку і шумів реалізації конкретної системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad [20, 21].

$$N_{dB} = k_B T_c + 10 \log_{10}(BW_{60GHz}) + L_I + n_F \quad [\text{дБ}] \quad (3.12)$$

де: $k_B T_c$ – спектральна щільність потужності шуму ($k_B T_c = -174$ дБ/Гц); BW – ширина смуги пропускання в Гц для діапазону 60 ГГц; L_I – загасання при реалізації апаратури стандарту IEEE 802.11ad ($L_I = 10$ дБ); n_F – коефіцієнт шуму апаратури стандарту IEEE 802.11ad ($n_F = 5$ дБ).

Тоді для апаратури зв'язку стандарту IEEE 802.11ad отримуємо

$$N_{dB} = -65.6555 \quad [\text{дБ}] \quad \text{и} \quad N_W = 2.72 \cdot 10^{-10} \quad [\text{Вт}]. \quad (3.13)$$

На рис. 3.7 і 3.8 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 / сек (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) в залежності від кліматичної зони України. Радіус дії для осередків мікро-стілники (Micro-Cell): 950 м (зона К); 1000 м (зона Н) і 1050 м (зона Е). Радіус дії для осередків піко-стілники (Pico-Cell): 180 м (зона К); 185 м (зона Н) і 190 м (зона Е).

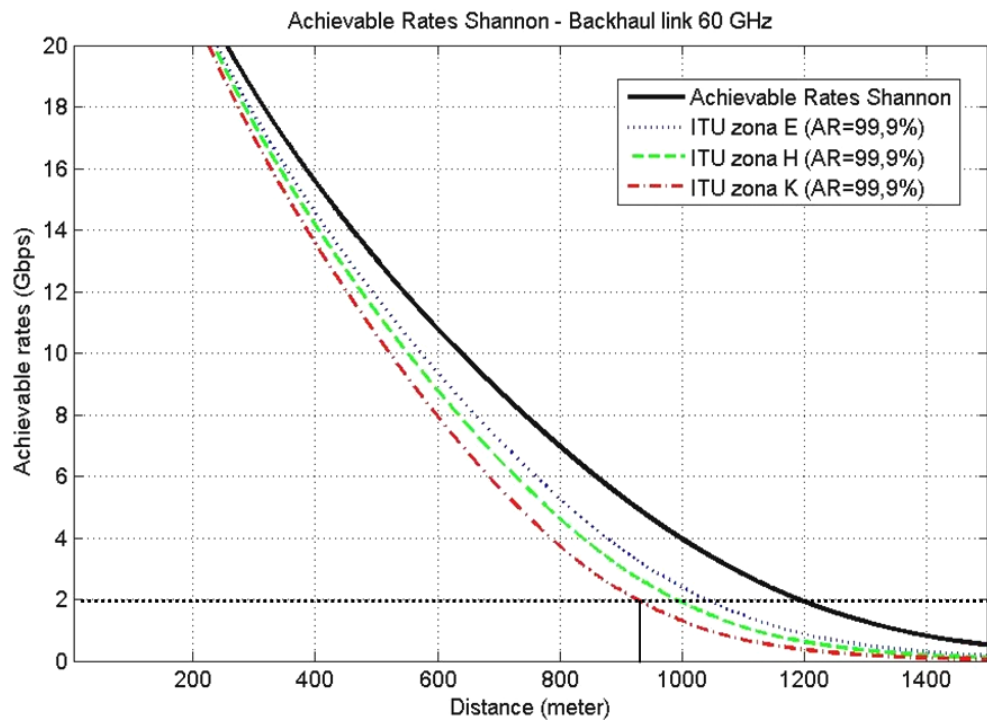


Рисунок. 3.7 - Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

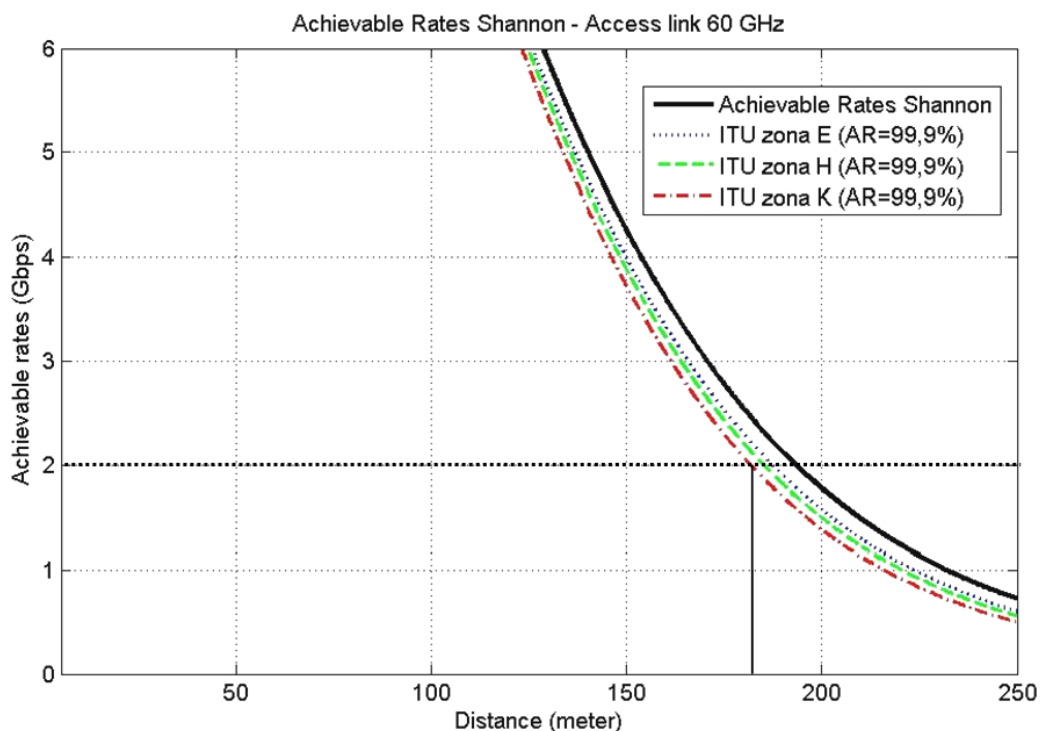


Рисунок. 3.8 - Залежність граничної швидкості передачі інформації від довжини радіоканалу в режимі абонентського доступу (Access link) 60 ГГц для трьох кліматичних зон України

Для оцінки реальної пропускної здатності каналу зв'язку на основі існуючих систем необхідно звернутися до стандарту IEEE 802.11ad [21], 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 і максимальна досяжна при цьому швидкість передачі інформації DR (Data rate).

В табл. 3.4 представлені дані о чутливості приймача для режиму роботи з використанням однієї несучої SC [21]. Этот режим является обязательным для всех фирм производителей оборудования.

Таблиця 3.4

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 радіомодему IEEE 802.11ad встановлює індекс модуляції MCS_i

$$P_{RX}^{MCS_i} < P_{dB}^{RX}(d) \leq P_{RX}^{MCS_{i+1}} \quad [dBm]. \quad (3.14)$$

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 рис. 3.9 і 3.10 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 / сек 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 мікро-стілньники складе - 600 м; а радіус дії для осередків піко-стілньники - 85 м.

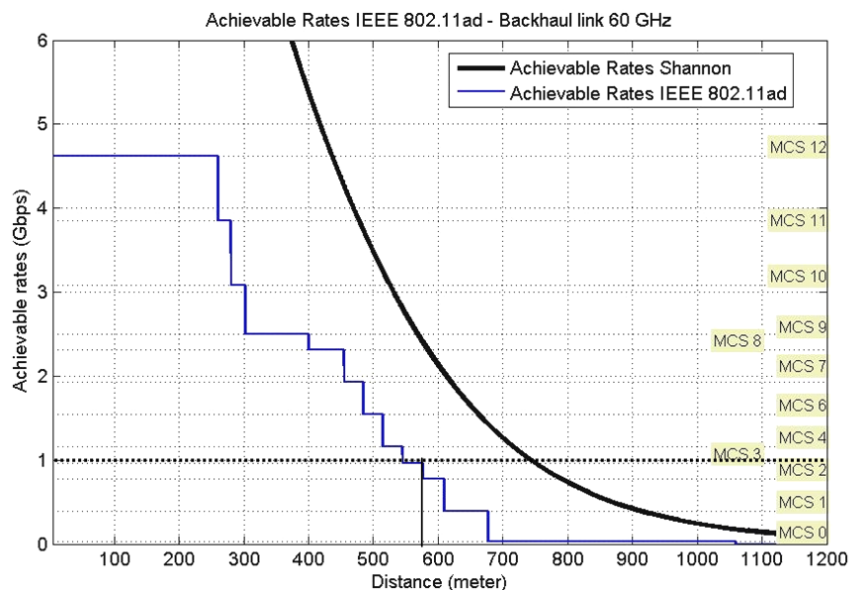


Рисунок. 3.9 - Залежність швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі точка-точка (Backhaul link)

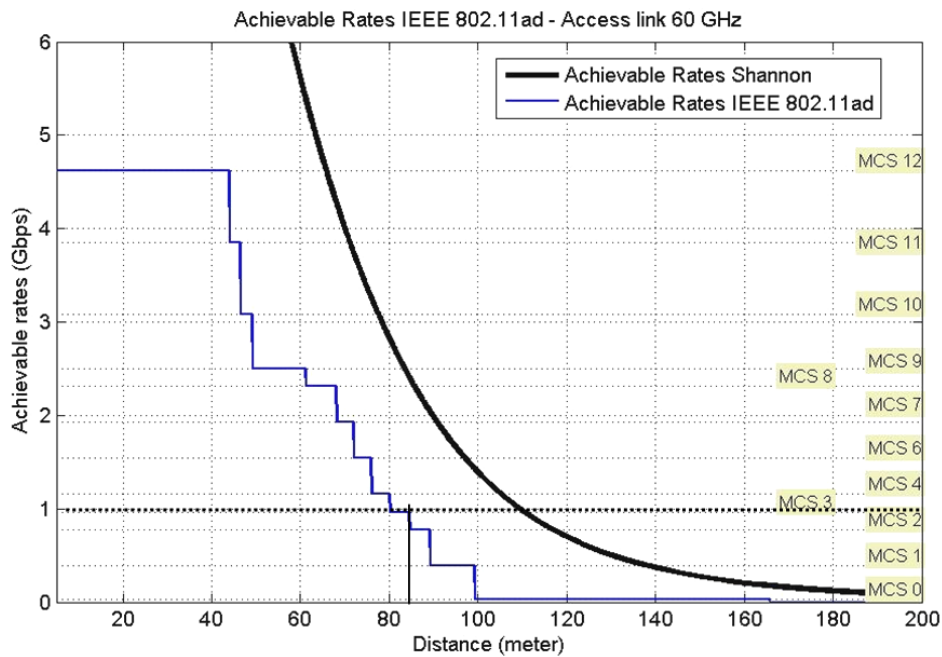


Рисунок. 3.10 - Залежність швидкості передачі інформації від довжини радіолінії системи зв'язку стандарту IEEE 802.11ad 60 ГГц в режимі абонентського доступу (Access link)

Підводячі підсумки розділу можна сказати:

1. В даний час кількість мобільних користувачів значно зросла, і вони хочуть більш надійного обслуговування і високої швидкості передачі даних. Мережі 5G в міліметровому діапазоні хвиль можуть забезпечити більш високу швидкість передачі даних.

2. Передача сигналів ММ ДХ вище 10 ГГц вразлива до опадів. Дощ, сніг, мокрий сніг, частинки льоду і град можуть послаблювати і розсіювати мікрохвильові сигнали і, отже, приводити до зниження доступності з точки зору якості системи.

3. У даній роботі представлена модель і практичні результати оцінки бюджету лінії зв'язку, на основі якого визначено досяжні відстані між передавачем і приймачем для різних кліматичних зон України.

4. У роботі проведена теоретична оцінка досяжних швидкостей передачі інформації, засновані на пропускну здатність каналу зв'язку по Шеннону, і оцінка практично досяжних швидкостей передачі даних для різних сегментів мережі

передачі інформації для апаратури стандарту IEEE 802.11ad, що використовує різні схеми модуляції кодування (MCS).

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРАХУНКІВ

На рис. 4.1 показані ймовірності перевищення значень інтенсивності дощу, відкладена по осі ординат. Ці дані були отримані нами з метеоспостережень 2018 року і 2019 з 5-хвилинним інтервалом інтегрування в Харкові (50 с.36 Е). Розрахунки атмосферного ослаблення для 12 ГГц, 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 94 ГГц були засновані на цих метеорологічних даних в даній роботі.

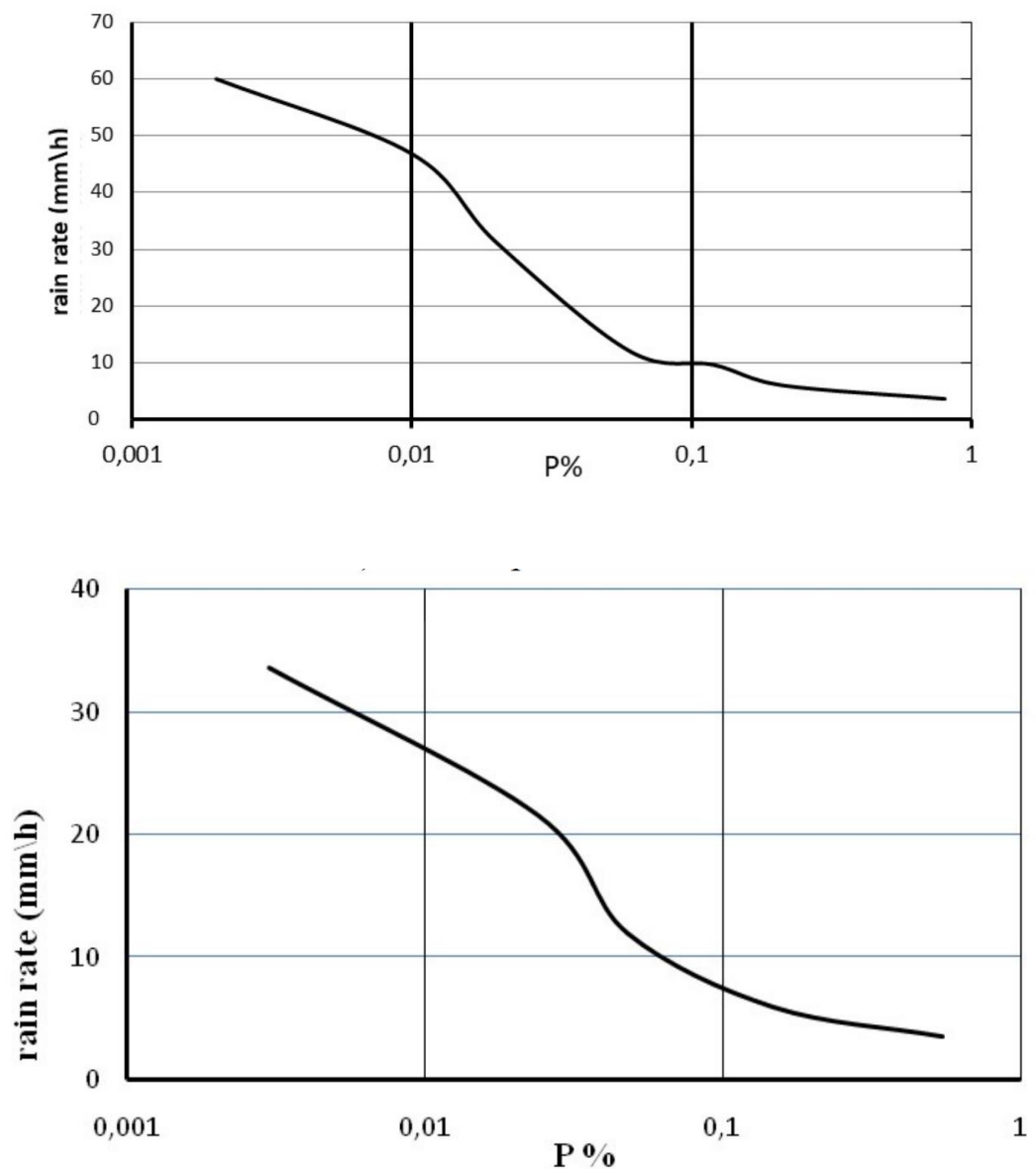


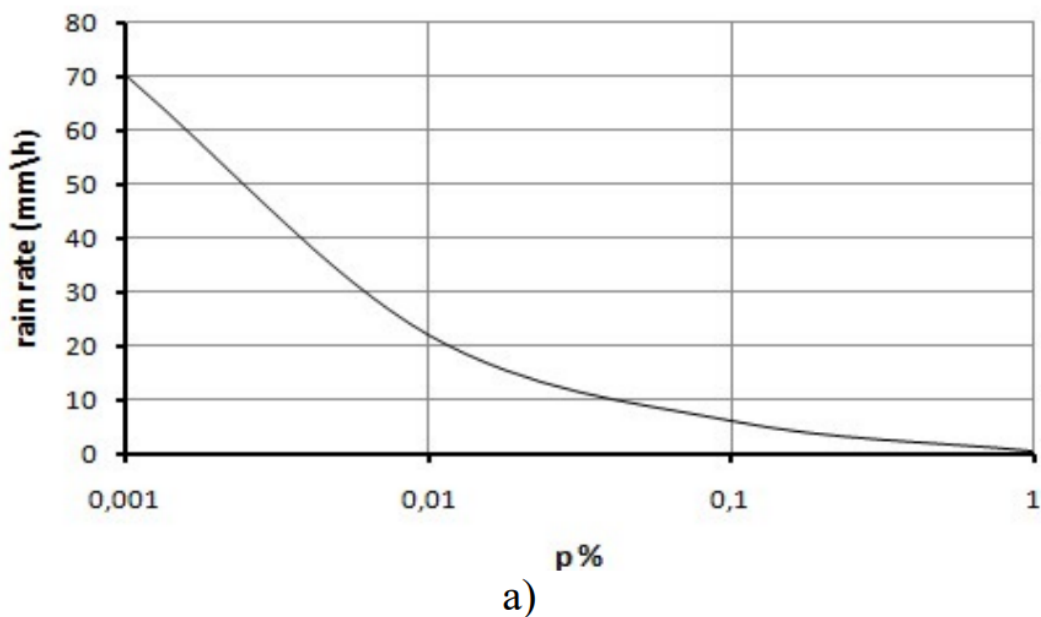
Рисунок. 4.1 - Кумулятивний розподіл інтенсивності дощу за чотири місяці за 2018 г. (а) і 2019 (б).

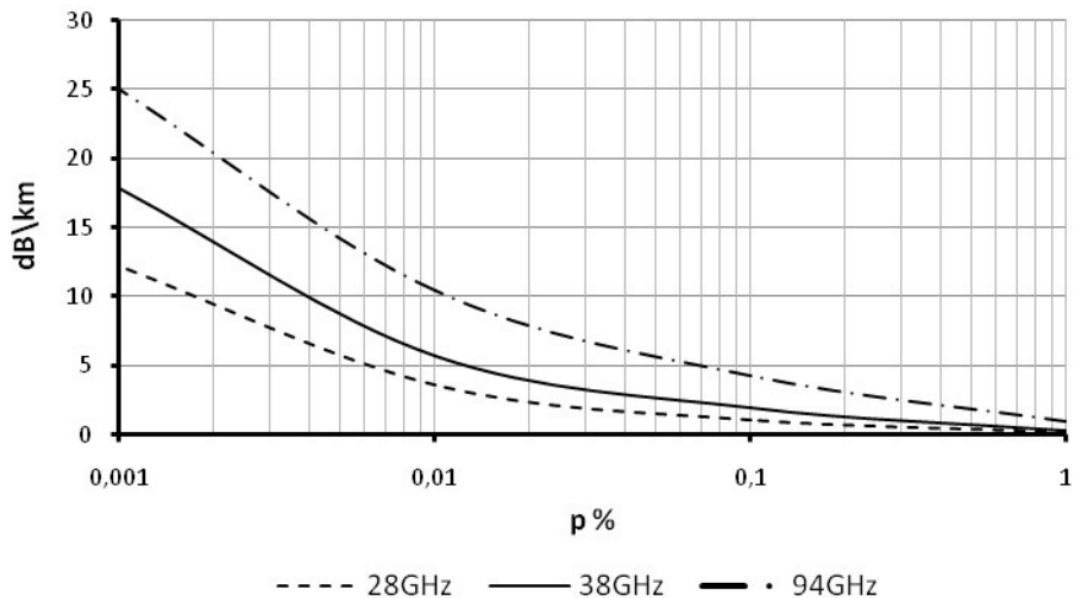
МСЕ рекомендує використовувати Рек. ІТУ-R PN.837-1 для регіонів, в яких немає експериментально обґрунтованих даних по кумулятивному розподілу дощу. Потім можна виділити одну з трьох зон, де розташований Харків (зона Е) відповідно до карти ІТУ кліматичних зон України. МСЕ надає наступні дані для цієї зони Е.

Таблиця 4.1

rain rate (mm/h)	70	22	6	0.6
p%	0.001	0.01	0.1	1

Ми можемо бачити кумулятивний розподіл значень інтенсивності дощу, а потім побудувавши графік залежності за даними ІТУ для порівняння з нашими експериментальними даними. Легко помітити значний ефект річний мінливості погодних умов, а також деякі відмінності даних ІТУ і наших експериментальних даних 2018-2019 рр.





б

Рисунок. 4.2 - Річне кумулятивний розподіл значень інтенсивності дощу по зоні Е України за даними ITU-R (а) і відповідний розрахунок питомою значення загасання на частотах 28, 38, 94 ГГц (б).

Значна річна різниця між 2019 і 2018 рр. для сильного дощу (різниця майже в два рази) і для ймовірностей нижче і близьких до 0,01% чітко видно на малюнку 4.1. Можна також відзначити гарну згоду між нашими експериментально отриманими даними і дані розраховані з моделлю ITU (рис. 4.2) для значень ймовірності більше ніж 0,1%, а також значне збільшення їх різниці, так як значення ймовірності зменшуються.

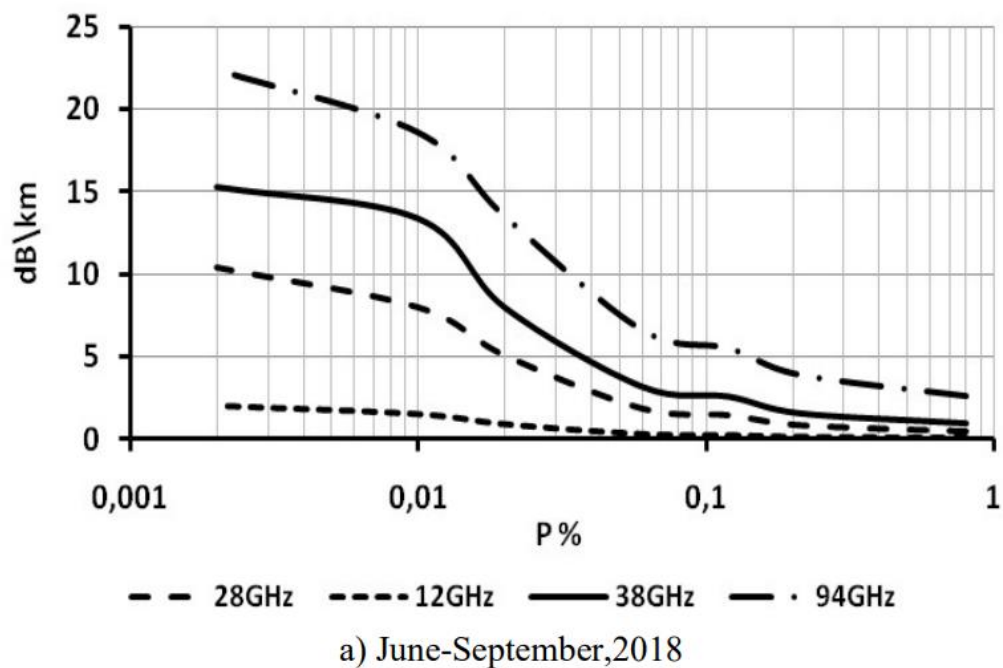
На рис.4.3 представлені розраховані залежності кумулятивного розподілу ймовірностей питомого загасання атмосфери на різних частотах за 4 місяці період 2018 і 2019 років (червень-вересень).

На рис.4.4 представлені розраховані залежності кумулятивного розподілу ймовірностей питомого загасання атмосфери для різних частот в липні 2018 року і Липень 2019 року, а рис. 4.5 - червень.

Дані, представлені на малюнках, дозволяють кількісно оцінити ймовірність перевищення значень конкретних атмосферних послаблень за вказаний 4-місячний період і щомісяця. Аналіз результатів дозволяє відзначити, що найбільш

несприятливий місяць в році липень. В той же час, помітні відмінності за ці два роки в червні і липні.

Для них характерно менша кількість опадів в 2019 р ніж в 2018 в ці місяці. Відмінностей було ще більше помітно в найближчі два місяці. Отже, якщо в серпні і Вересень 2018 р значення питомої загасання аналогічні і значно менше, ніж в червні або липні, потім в серпні 2019 р не було сильних опадів вище 4 мм \ год (Загасання менше 3 дБ \ км при $p = 0,01\%$ на всіх розглянуті частоти). У вересні 2019 р опадів (рис.4.6) і загасання були на рівні червня цього року і значно більше, ніж у вересні 2018. Для обох років характерно, що атмосферні значення загасання для $p = 0,01\%$ були менш 15 дБ \ км для всіх частот, що не перевищують 38 ГГц, і для будь-яких терміни розгляду. Тобто, якщо вибрати 15 дБ \ км як поріг відключення зв'язку, то хоча б на 2018 і 2019, комунікацію можна вважати надійною (З ймовірністю збою менш 0,01%) у всіх частоти нижче 40 ГГц.



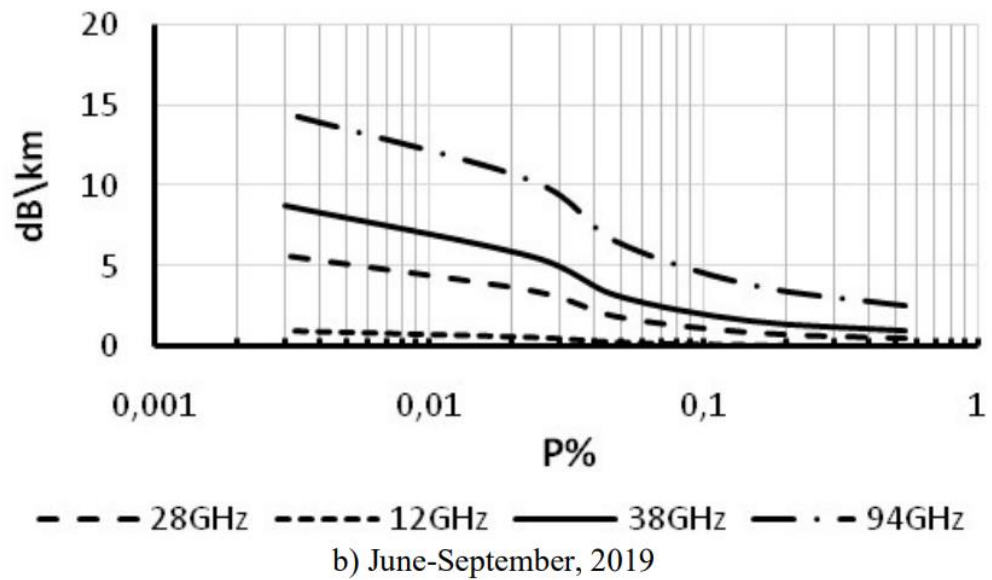
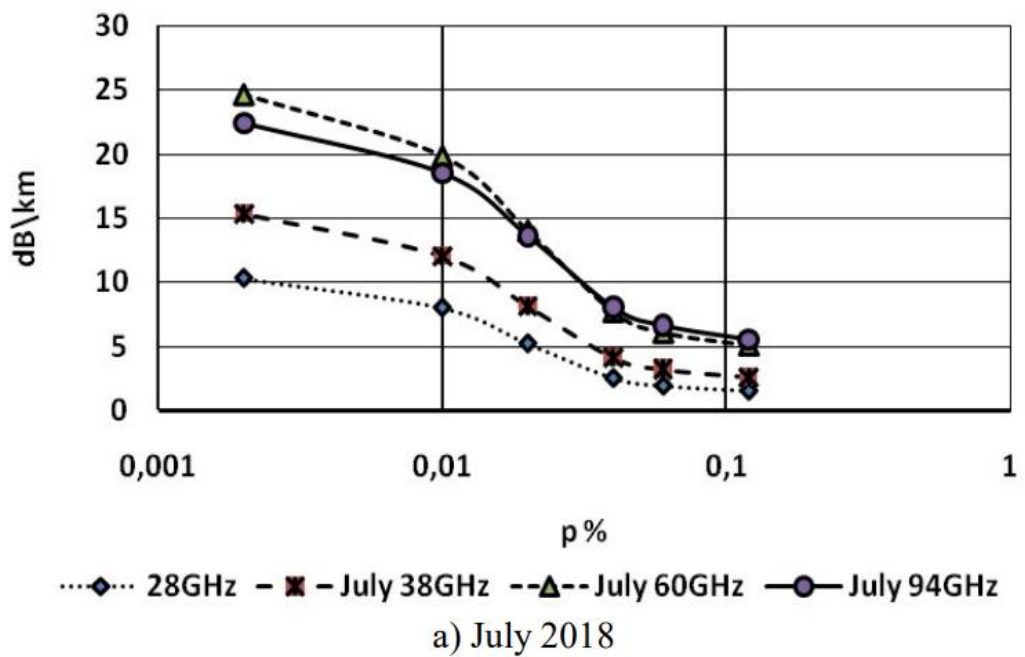


Рисунок. 4.3 - Кумулятивний розподіл питомого загасання в атмосфері на теплі періоди 2018 і 2019 роки.



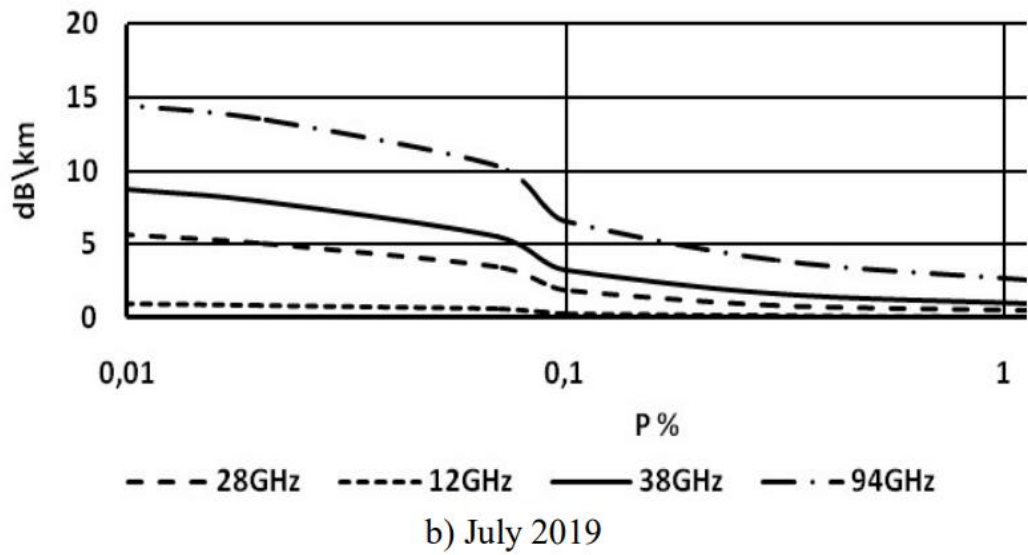


Рисунок. 4.4 - Липневі кумулятивні розподілу питомої загасання атмосфери для різних частот.

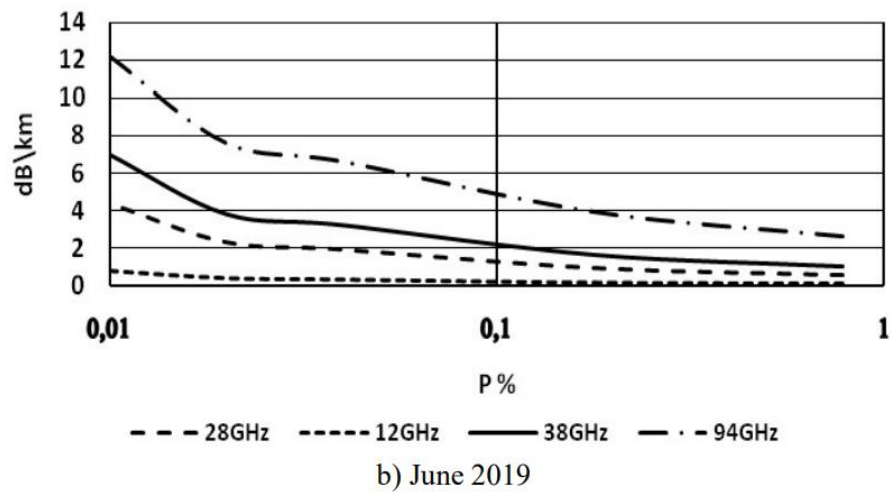
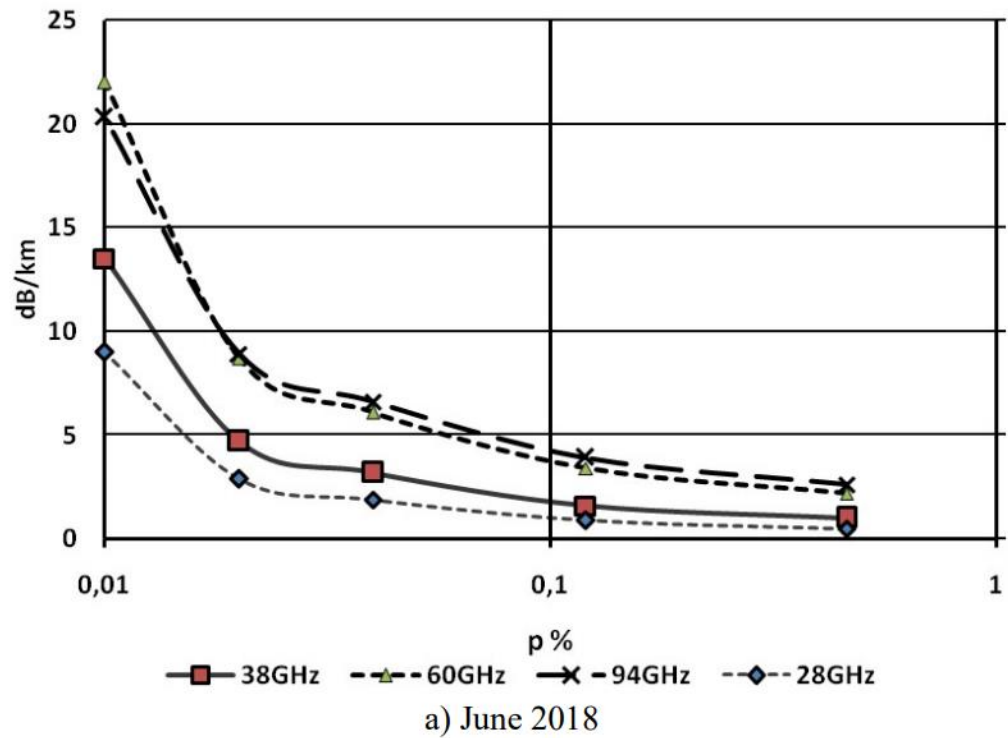


Рисунок. 4.5 - Кумулятивний розподіл питомого загасання атмосфери для різних частот.

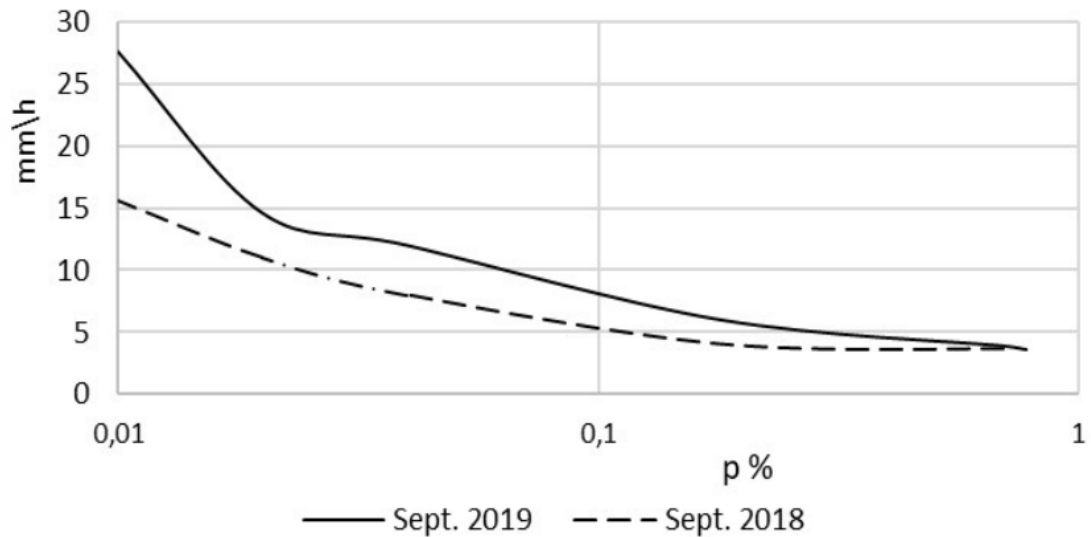


Рисунок. 4.6 - Кумулятивний розподіл значень інтенсивності дощу в Харкові на Вересень 2018 і 2019 роки.

Відповідно, навіть для нижчих ймовірностей слід очікувати високих значень питомого загасання. Однак якщо врахувати проблеми зі зв'язком в гірші місяці (червень і липень), потім для кожного з них індивідуально, загасання на 60 ГГц і 94 ГГц з вірогідністю 0,01% перевищить зазначений вище (15 дБ \ км) поріг збою зв'язку. Це призводить до зниження надійності передачі даних. Відповідно, можна зробити висновок, що б забезпечити прийнятні вимоги до надійності канали зв'язку для цих умов необхідно збільшити потужність передавача або розміри антени і зменшити відстань між антенами.

ВИСНОВКИ

В роботі наведені дані спостережень за два роки 2018 та 2019 інтенсивності дощу в найгірший період року, отримані з інтервалом усереднення 5 хв Харкова. Експериментально обґрунтовані оцінки ймовірності відключення трапосферної комунікації для заданого порогу внаслідок проявів критичної швидкості дощу можуть бути зроблені на їх основі. Оцінки метеорологічних ситуацій, характерних для перерв зв'язку в різних діапазонах довжин хвиль, визначалися за найгірший місяць та за 4 місяці теплого періоду року за допомогою радіофізичної моделі МРМ.

Звертає увагу той факт, що при проектуванні комунікацій слід враховувати умови протягом місяців, коли ймовірність та тривалість відключень максимальні.

Дані, представлені в цьому дослідженні та вищезазначені висновки, можуть бути корисними для формування загальної стратегії підвищення надійності та розбудови інфраструктури перспективних мереж зв'язку.

Нові отримані дані про ймовірність швидкості дощу, проаналізовані в роботі, дозволяють вперше одному з регіонів України дати обґрунтовану кількісну оцінку ймовірності та тривалості подій відключення в розроблених комунікаційних зв'язках.

Подальше вивчення статистики ослаблення радіохвиль ММ діапазону в атмосфері планується протягом декількох річних циклів безперервних вимірювань з 1 хв. інтервал інтеграції даних радіофізичних та метеорологічних спостережень у різних довжинах хвиль.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

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

telecommunication," 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kiev, 2017, pp. 46-51. doi: 10.1109/ICATT.2017.7972583

10. Ruzhentsev N.V. and Churilov V.P. Terrain radiation - measurement investigation at 3-mm wave band //International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996,v.17, N 2, p. 433-449.

11. N. V. Ruzhentsev Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band // Radio Science, v. 38, N 3, 2003, 8043, pp.Mar 8-1 – 8-7, doi:10.1029/2002RS002668

12. ITU-R: Characteristics of Precipitation for Propagation Modeling, Recommendation P.837-5. ITU-R Recommendations, P Series, International Telecommunications Union, Geneva, 2007

13. H.J. Liebe, "MPM – an atmospheric millimeter waves propagation model," International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, vol.10, no 6, pp. 631-650.

14. Luis Emiliani¹, Lorenzo Luini Evaluation of models for the conversion of T-min rainfall distributions to an equivalent one-minutedistributionto be used in Colombia \\ Rev. Fac. Ing. Univ.Antioquia N 56, pp. 99-119, Diciembre, 2010

15. Talukdar R, Saikia M. Evolution and Innovation in 5G Cellular Communication System and Beyond: A Study [J]. Computer Science, 2014.

16. El Kashlan M, Duong T Q, Chen H H. Millimeter-wave communications for 5G: fundamentals: Part I [Guest Editorial] [J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(9):52-54.

17. El Kashlan M, Duong T Q, Chen H H. Millimeter-wave communications for 5G – Part 2: applications [Guest Editorial] [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1):166-167.

18. Boccardi F, Heath R W, Lozano A, et al. Five disruptive technology directions for 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 52(2):74-80.

19. Tsopa O.I. Prediction model of energy security for the systems of subscriber radio access with branched street and corridor communications channels / A. A. Strel'nitskiy, A. E. Strel'nitskiy, O. I. Tsopa and V. M. Shokalo // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc., 2011. – Vol. 54. – No. 2, – pp. 61-67.

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