

Цопа О.І.

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування.

Керівник

Руженцев М.В.

Студент

Ярмак Г.

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 Ярмаку Геннадію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка впливу погодних умов на пропускну здатність та стабільність роботи радіомосту 60 ГГц

затверджена наказом по університету від 04 листопада 2019 р. № 1729ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 5 грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз роботи каналу зв'язку 60 ГГц.

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 60 ГГц;

3. Експериментальне дослідження впливу дощу на радіоміст частотою 60 ГГц.

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

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел за темою роботи	05.11.2019	
2	Огляд видів впливу на радіомост	15.11.2019	
3	Дослідження особливостей роботи радіомоста Частотою	22.11.2019	
4	Експериментальне дослідження впливу дощу на на радіоміст частотою 60 ГГц	30.11.2019	
5	Оформлення пояснювальної записки та виготов-слайдів презентації	05.12.2019	

Дата видачі завдання 04 листопада 2019 р.

Студент _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: сторінок – 99, рисунків – 23, таблиць – 8, джерел – 13.

МИЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН, ДІАГРАММА СПРЯМОВАНOSTІ, АНТЕНА, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ, ВЕЛЬМЕ ВИСОКІ ЧАСТОТИ.

Об'єкт дослідження – методи оцінки впливу погодних умов на пропускну здатність та стабільність роботи радіомосту 60 ГГц.

Предмет дослідження – радіометричний комплекс 8 мм.

В атестаційної роботі проведенний огляд впливу різних погодних умов на міліметровий діапазон хвиль.

Проаналізовано різні методики розрахунку послаблення сигналу.

ABSTRACT

The work contains: pages – 99, figures – 23, tables – 7, references to sources – 26.

Object of research is methods for assessing the impact of weather conditions on the bandwidth and stability of 60 GHz radio bridge.

Subject of research – 8 mm radiometric complex.

In the evaluation work, an overview of the influence of different weather conditions on the millimeter wavelength range was conducted.

Different methods of calculation of signal attenuation are analyzed.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ММ –міліметровий

РМ – радиометрический

ЦРРЛ – цифрова радіорелейна лінія

РРЛ – радіорелейна лінія

ММДХ – міліметровий діапазон хвиль

ВОЛС – волоконно-оптична лінія зв'язку

LoS – Line of sight(анг.), лінія видимості

ВВЧ – вельме високі частоти

КВП – коефіцієнт використання поверхні

ККД – коефіцієнт корисної дії

КСД – коефіцієнт спрямованої дії

ЛОМ – локальні обчислювальні мережі

ТЗІ – технічні засоби інформації

ДС – діаграма спрямованості

ДЗ – дистанційного зондування

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ.....	9
1.1 Основні поняття.....	9
1.2 Принципи розповсюдження хвиль міліметрового діапазону в атмосфері.....	13
1.3 Вплив природних умов та втрати на трасі в міліметровому діапазоні.....	18
2 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ РОЗПОВСЮДЖЕННІ ХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ.....	24
2.1 Втрати у вільному просторі та ослаблення сигналу в атмосферних газах.....	24
2.2 Дифракційні завмирання і ширина траси.....	25
2.2.1 Основа методу прогнозування дифракційних втрат.....	26
2.2.2 Основа процедур визначення просвіту траси.....	26
2.3 Сцинтиляційні завмирання.....	28
2.4 Огляд механізмів поширення радіохвиль, пов'язаних з багатопроменевими завмираннями.....	29
2.5 Ослаблення в опадах.....	30
2.5.1 Основа методу прогнозування ослаблення в дощі.....	32
2.5.2 Питомі ослаблення.....	33
2.5.3 Ефективна довжина траси.....	34
2.5.4 Приклади застосувань.....	34
2.5.5 Прогнозування поєднання дощу і мокрого снігу.....	35
2.6 Довгострокове масштабування частоти і поляризації статистичних даних про ослабленні в дощі.....	40
2.6.1 Масштабування для однієї частоти.....	40
2.6.2 Поляризаційне масштабування.....	41
2.7 Статистичні дані тривалості і коефіцієнта завмирання, викликаного дощем..	41
2.8 Сезонні коливання - найгірший місяць.....	43
2.9 Обговорення оцінки моделі (випробування)	44

2.10 Приклад обчислень.....	44
2.11 Спаренні і траси які сходяться.....	46
2.11.1 Корельовані завмирання на транзитних трасах.....	46
2.11.2 Траси що сходяться.....	47
2.12 Траси з пасивними ретрансляторами.....	48
2.13 Спотворення, обумовлені поширенням.....	49
2.14 Моделі багатопроменевого поширення.....	50
2.15 Параметричні моделі.....	50
2.16 Розрахунок якісних показників.....	51
2.16.1 Метод кривої сигнатури.....	52
3 АПАРАТУРНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАУКОВО-ПРИКЛАДНОЇ РАДІОМЕТРІЇ АТМОСФЕРИ.....	56
3.1 Постановка задачі.....	56
3.2 Вибір робочих частот і схема побудови вимірювального комплексу.....	62
3.2.1. Обґрунтування вибору робочих частот.....	62
3.2.2 Схема побудови вимірювального комплексу.....	67
3.3 Результати експериментальних досліджень.....	70
3.4 Питання методичного забезпечення спостережень.....	74
3.4.1 Оцінки точності процедур калібрування радіометра.....	75
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	83
Додаток А.....	86
Додаток Б.....	8

ВСТУП

Життя та розвиток сучасного суспільства не можливо уявити без такого широкого різноманіття систем передачі інформації. Об'єм інформації безперервно зростає, збільшується дальність зв'язку, більш високими стають вимоги до надійності і якості зв'язку, ефективності використання обладнання. Все це призводить до безперервного вдосконалення всіх систем, в тому числі і систем радіозв'язку.

Сучасні системи радіозв'язку розвиваються в напрямку збільшення їх пропускної спроможності і завадостійкості. Особливо інтенсивно в останнє десятиліття розробляються питання переходу від аналогової форми передачі повідомлень до цифрової. Використання цифрових методів дозволяє не тільки підвищити надійність передачі, але і в значній мірі зменшити витрати на виробництво і експлуатацію апаратури та ліній зв'язку.

Метою роботи було побудувати лінії зв'язку з частотою 60 ГГц. Для цього необхідно виконати програмування трафік-генератора 1ГГб/с. Завдяки цьому вдалося дослідити загасання каналу зв'язку у дощі.

Актуальність радіорелейних ліній зв'язку прямої видимості займають одне з найважливіших місць в системах засобів передачі інформації. Швидкий розвиток технології відкриває нові можливості в цій області. Потреба в недорогих надійних ЦРРЛ з відносно невеликою протяжністю і ємністю стрімко зростає. Для частот вище 10 ГГц розроблено і є на ринку велика кількість типів апаратури. Конструктивно така апаратура виконується у вигляді моноблоків, коли прийомопередаюче обладнання і антена складають єдине ціле. Це дає можливість будувати на лініях зв'язку прості обслуговуються проміжні станції з відносно недорогими антенними опорами.

1 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

1.1 Основні поняття

Через швидкий прогрес та розвиток систем передачі інформації як в нашій країні, так і за кордоном вже стало ясно, що міліметрові хвилі (ММХ) – це новий величезний діапазон частот, який сильно перевищує по займаній смузі частот все те, що раніше використовували люди. Великий проміжок часу ММХ вважалися непридатними для корисного використання через те, що не було досконалих засобів генерації, прийому, каналізації НВЧ коливань, а також не було відомостей про їх поширення в земній атмосфері. Численні розробки нових засобів генерації і прийому НВЧ сигналів на частотах вище 30 ГГц, а також вивчення особливостей поширення цих хвиль в стратосфері допомогли створити системи зв'язку в міліметровому діапазоні хвиль. Сьогодні є великий інтерес зробити аналіз тенденцій дослідження і розповсюдження міліметрових систем зв'язку за даними як вітчизняних так і зарубіжних публікацій.

Багато систем повністю автоматизовані, керуються мікропроцесорними або комп'ютерними пристроями, мають гнучку структуру і забезпечують реалізацію різних конфігурацій мереж. Якщо порівняти використання радіорелейних ліній та волоконно-оптичних ліній зв'язку, то можна відзначити наступні переваги бездротових технологій, які з одного боку вимагають набагато менших витрат і часу на розгортання, ніж ВОЛЗ, з іншого боку можуть бути прокладені оперативно в складних географічних умовах. Крім того, радіорелейні лінії найбільш ефективні при розгортанні розгалужених цифрових мереж у великих містах та індустріальних зонах, де прокладка ВОЛЗ занадто дорога або неможлива, а якість передачі інформації за сучасними РРЛ практично не поступається ВОЛЗ. Зокрема, треба зазначити таку проблему кабельних ліній зв'язку, як банальне злодійство приводить до зниження надійності ВОЛЗ. На користь застосування радіорелейних систем для побудови територіально-розподілених мереж зв'язку говорить і той факт, що в світі більшість міжмісь-

ких каналів зв'язку утворено на таких системах (в США – 60-70%, в країнах Західної Європи понад 50%, в Японії близько 50%[2]). Це обумовлено перш за все відносною простотою споруди лінії при незначних витратах на будівництво і експлуатацію, а також можливістю оперативного та швидкого вирішення проблем розвитку і мережі без додаткових капітальних витрат.

Сьогодні РРЛ стали важливою складовою частиною цифрових мереж електро-зв'язку – відомчих, корпоративних, регіональних, національних і навіть міжнародних, оскільки мають ряд важливих переваг, в тому числі:

- можливість швидкої установки обладнання при невеликих капітальних витратах (малі габарити і маса РРС дозволяють розміщувати їх, використовуючи вже наявні приміщення, опори і всю інфраструктуру споруд);
- організація багатоканального зв'язку на ділянках місцевості зі складним рельєфом (ліс, гори, болота та ін.), – економічно вигідна, а іноді і єдино допустима;
- можливість застосування для аварійного відновлення зв'язку в разі лиха, при рятувальних операціях та ін.;
- ефективність розгортання розгалужених цифрових мереж у великих містах та індустріальних зонах, де прокладка нових кабелів занадто дорога або неможлива;
- якість передачі інформації по РРЛ практично не поступається ВОЛЗ і іншим кабельним лініям.

За шість десятиліть свого розвитку радіорелейні лінії (РРЛ) перетворилися в ефективний засіб передачі сотень і тисяч телефонних сигналів на відстані в тисячі кілометрів, конкуруючи з іншими засобами зв'язку, в тому числі кабельними і супутниковими, вдало доповнюючи їх.

Відкриття в 90-х роках ринку телекомунікацій країн колишнього СРСР для зарубіжних постачальників наочно виявило істотне відставання технічного рівня наших радіорелейних станцій (РРС) від світового рівня. І не дивно, що «серйозні» оператори зв'язку стали використовувати переважно закордонні РРС[5]. Розуміючи зростаючу конкуренцію, російські розробники і виробники РРС без залучення іноземного капіталу, використовуючи вітчизняну науково-технічну базу, в короткі терміни

зуміли створити якісно нове покоління вітчизняних РРС, які, не поступаючись закордонним аналогам за основними технічними характеристиками, мають значно нижчу ціну і незаперечні переваги в частині забезпечення їх монтажу і введення в експлуатацію, організації гарантійного та післягарантійного обслуговування.

Для цих РРС створені СВЧ-вузли на основі GaAs технології, в них реалізовані сучасні методи модуляції QPSK, системи телеобслуговування і телеспостереження. Для підвищення надійності в станціях використані компоненти фірм Hewlett-Packard, Motorola, Temis, а також пристрої цифрової обробки і мультиплексори цифрових потоків, виконані на програмованих логічних інтегральних схемах (ПЛІС).

Сучасна радіорелейний апаратура виготовляється у вигляді двох складових частин: апаратури зовнішнього розміщення, що включає в себе виносні приймально-передавальні модулі і антену, і апаратури внутрішнього розміщення. У зовнішній апаратурі розміщують все елементи, залежні від діапазону і робочих частот, а апаратура внутрішнього розміщення містить лише елементи, що визначають трафік і стики. При такому виконанні апаратури забезпечуються велика уніфікація, гнучкі можливості експлуатації, передумови поетапного нарощування пропускної здатності. Багато систем повністю автоматизовані, управляються мікропроцесорними або комп'ютерними пристроями.

Технологія цифрових РРЛ, що досягла високого якісного і кількісного розвитку в усьому світі, стала в даний час абсолютно необхідною ланкою, створюваного нині в Росії нового телекомунікаційного простору.

Побудова систем передачі залежить від багатьох факторів, таких як вид повідомлення, критерій якості передачі сигналу, вартість і т.д. Зазвичай при проектуванні передбачається заданий вид повідомлення, а також кореспондуючі пункти. Вже на першому етапі проектування повинні бути обрані найбільш підходящі системи, що задовольняють вимогам соціально-економічного характеру.

Міліметрові хвилі (вельми високі частоти, скор. ВВЧ,) – частотний діапазон радіохвиль з довжиною хвилі в межах від 1 до 10 мм і частотою від 30 до 300 ГГц. Міліметровий частотний діапазон охоплює частково K_a -діапазон і повністю V-, W- і mm-діапазони радіолокаційних станцій (РЛС)[3].

Для зменшення габаритних розмірів систем служить перевага цього діапазону, міліметрових хвиль, малі розміри антен і велика абсолютна смуга частот (що забезпечує можливість спільного використання діапазону великим числом радіосистем). Проте, якщо зрівняти з більш низькочастотними діапазонами, радіохвилі міліметрового діапазону будуть сильніше загасати при поширенні в земній атмосфері. Загасання викликано резонансним поглинанням енергії хвиль в атмосферних газах, зокрема, сильне поглинання в смузі 57–64 ГГц обумовлено взаємодією з молекулами кисню, а також в гідрометеорах (дощ, туман, сніг та ін.). Через ці причини радіосистеми міліметрового діапазону на землі характеризуються малою дальністю дії (від декількох кілометрів до кількох сотень метрів) і сильною залежністю від погодних умов.

В даний час для використання радіочастот міліметрового діапазону виділені окремі піддіапазони (табл. 1.1).

Слід зауважити що в діапазонах кіло-, гекто- і дека-метрових хвиль передаються в основному мовні програми, частково – сигнали точного часу і здійснюється обмежений вид спеціальних магістральних зв'язків.

Обладнання діапазону 60 ГГц можливо використовувати тільки на невеликих відстанях (не більше 1 – 1.5 км[5]). Дальність зв'язку в даних частотах обмежена кисневим поглинанням. Проте із позитивних явищ даний ефект забезпечує високу електромагнітну сумісність і можливість використання на одній території великої кількості радіоелектронних засобів (РЕЗ) з повторним використанням частот.

Частоти діапазонів Q-Band і E-Band значно більш придатні для організації радіотрас більшої дальності (до 10– 15 км), оскільки атмосферне згасання у них на рівні звичайного ВВЧ діапазону.

Одним із актуальних завдань сьогодні є освоєння діапазону ММХ, в якому відведена для супутникового зв'язку смуга частот набагато перевищує сумарну смугу частот, яка використовується на більш довгих хвилях, що дозволяє збільшити більш, ніж на порядок, обсяг інформації по лініях супутникового зв'язку.

Таблиця 1.1 – Піддіапазони радіочастот міліметрового діапазону хвиль

Назва піддіапазону	Робоча частота, ГГц	Визначення піддіапазону
Q-band	40.5-43.5	Перша широка смуга, доступна для цивільного зв'язку. Виділена для безпроводних комунікацій в ЄС.
V-band	57-66	В якій аномально велике атмосферний поглинання сигналу. В США комісія зв'язку виділила смугу частот для неліцензованих бездротових систем.
E-band	71-76 81-86 92-95	На цих високих частотах короткі хвилі дають випромінювання дуже спрямоване якості, подібне видимого світла. атмосферні гази, такі як кисень, водяна пара, діоксид вуглецю і азот, можуть поглинати і збуджуватися, викликаючи ефекти змінного загасання променя, що залежать від метеорологічних і атмосферних умов.
W-band	92-96	Вікно прозорості в атмосфері

1.2 Принципи розповсюдження хвиль міліметрового діапазону в атмосфері

Будь-яка система передачі сигналів складається з трьох основних частин: передавального пристрою, приймального пристрою і проміжної ланки – з'єднує лінії зв'язку. Радіохвилі поширюються в просторі, він є проміжною ланкою в радіолініях. При поширенні радіохвиль з природничих трасах, тобто в умовах, коли середовищем служать земна поверхня, атмосфера, космічний простір, середовище є тією ланкою радіосистеми, яке практично не піддається управлінню.

Другим фактором, що визначає цінні властивості високочастотних діапазонів, є та обставина, що тут вдається реалізувати велику кількість радіоканалів з не пересічними смугами частот. Це дає можливість, з одного боку, широко використовувати принцип частотного поділу каналів, а з іншого – застосовувати широкосмугові системи модуляції, наприклад, частотну модуляцію. При певних умовах такі системи модуляції здатні забезпечити високу стійкість роботи радіоканалу.

При поширенні радіохвиль в середовищі відбувається зміна амплітуди поля хвилі (зазвичай – зменшення), зміна швидкості і напрямку поширення, поворот площини поляризації і спотворення переданих сигналів. У зв'язку з цим, проектуючи лінії радіозв'язку, необхідно:

- розрахувати енергетичні параметри лінії радіозв'язку (визначити потужність передавального пристрою або потужність сигналу на вході приймального пристрою);
- визначити оптимальні робочі хвилі при заданих умовах поширення;
- визначити справжню швидкість і напрямок приходу сигналів;
- врахувати можливі спотворення переданого сигналу і визначити заходи щодо їх усунення.

Для вирішення цих завдань необхідно знати електричні властивості земної поверхні і атмосфери, а також фізичні процеси, що відбуваються при поширенні радіохвиль.

Земна поверхня має суттєвий вплив на поширення радіохвиль: в напівпровідниковій поверхні Землі радіохвилі поглинаються; при падінні на земну поверхню вони відображаються; сферична форма земної поверхні перешкоджає прямолінійним поширенню радіохвиль.

Радіохвилі, що поширюються в безпосередній близькості від поверхні Землі (в масштабі довжини хвилі), називають земними радіохвилями (1 на рис. 1.1)[1]. Розглядаючи поширення земних хвиль, атмосферу вважають середовищем без втрат, з відносною діелектричною проникністю ϵ , що дорівнює одиниці. Вплив атмосфери враховують окремо, вносячи необхідні поправки.

У навколишньому Землю атмосфері розрізняють три області, які надають вплив на поширення радіохвиль: тропосферу, стратосферу і іоносферу. Межі між цими областями виражені не різко і залежать від часу і географічного місця.

Тропосферою називається приземної шар атмосфери, що простягається до Тропопауза (перехідного шару між тропосферою і стратосферою), що лежить над екватором на висоті 16-18 км, в помірних широтах – на 10-12 км і в полярних областях – на 7-10 км. У тропосфері відбувається викривлення траєкторії земних радіохвиль, зване рефракцією. Поширення тропосферних радіохвиль (2 на рис. 1.1)[1] можливо через розсіювання і відображення їх від неоднорідностей тропосфери. Радіохвилі міліметрового і сантиметрового діапазону в тропосфері поглинаються.

Стратосфера простягається від Тропопауза до висот 50-60 км. Стратосфера відрізняється від тропосфери істотно меншою щільністю повітря і законом розподілу температури по висоті: до висоти 30-35 км температура постійна, а далі до висоти 60 км різко підвищується. На поширення радіохвиль стратосфера надає той же вплив, що і тропосфера, але воно проявляється в меншій мірі через малу щільність повітря.

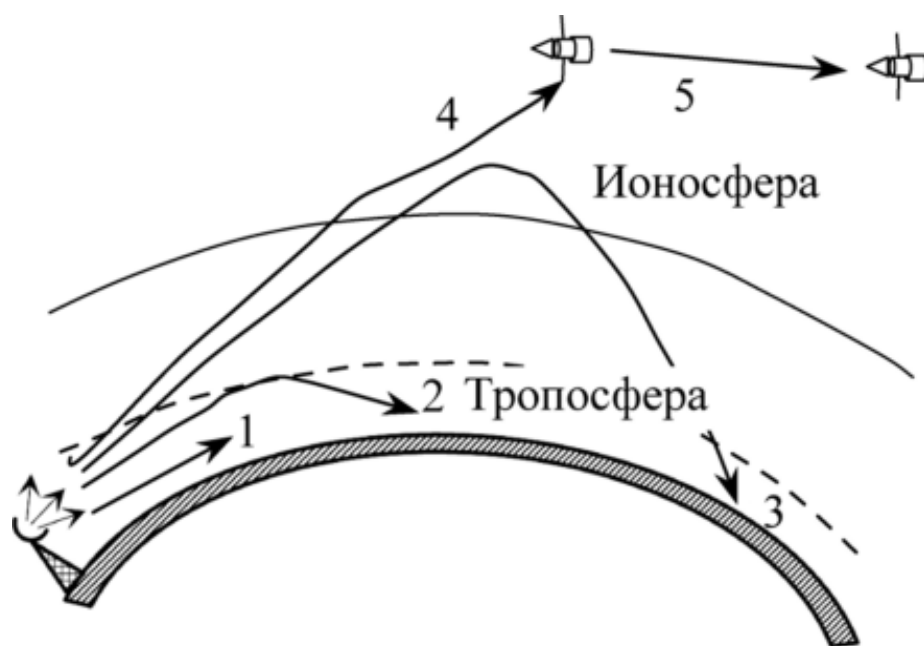


Рисунок 1.1 – Шляхи поширення радіохвиль

Іоносферою називається область атмосфери на висотах 60-10 000 км над землею поверхнею. На цих висотах щільність повітря дуже мала і повітря іонізований, тобто є велика кількість вільних електронів (приблизно $10^3 \dots 10^6$ електронів в 1 см^3 повітря). Присутність вільних електронів суттєво впливає на електричні властивості іоносфери і обумовлює можливість відображення від іоносфери радіохвиль довше 10 м. При одноразовому відображенні радіохвилі можуть перекидатися відстань по поверхні Землі до 4000 км. В результаті багаторазового відбиття від іоносфери і поверхні Землі радіохвилі можуть поширюватися на будь-які відстані по земній поверхні. Радіохвилі, що розповсюджуються шляхом відображення від іоносфери або розсіювання в ній, називають іоносферними хвилями (3 на рис. 1.1)[1]. На умови розповсюдження іоносферних хвиль властивості земної поверхні і тропосфери впливають мало.

Оскільки коефіцієнт заломлення в тропосфері змінюється з висотою (в нормальних умовах зменшується), то це призводить до викривлення променя радіохвилі. Припустимо, що промінь спрямований під деяким кутом до горизонту. Так як коефіцієнт заломлення з ростом висоти h зменшується, то при проходженні хвилі він буде поступово відхилятися від прямолінійної траєкторії в сторону земної поверхні у відповідності з законом Снелліуса, і тим сильніше, чим більше градієнт коефіцієнта заломлення. Це явище носить назву атмосферної рефракції. З метою врахування впливу атмосферної рефракції введено поняття еквівалентного радіуса кривизни променя.

Радіус земної кулі становить $a = 6378 \text{ км}$, а при нормальній тропосферної рефракції еквівалентний радіус $a_e = 8600 \text{ км}$. У нормальних умовах рефракція позитивна.

Позитивна рефракція сприяє поширенню радіохвилі уздовж землі на більш далекі відстані, оскільки промінь як би огинає земну поверхню. Під впливом метеорологічних умов розподіл індексу заломлення може відрізнятися від нормального режиму.

Тропосферний рефракція може бути негативною, нульовий

і позитивною. При негативній рефракції і радіус кривизни $R < 0$. Радіохвиля віддаляється від Землі, і дальність поширення зменшується. Хоча негативна рефракція зустрічається досить рідко, в деяких випадках це явище може призвести до погіршення проходження сигналу.

Нульова рефракція може скластися при певних метеорологічних умовах в деякому інтервалі висот, в якому.

Позитивна рефракція може бути: знижена, коли викривлення променю менше, ніж при нормальній рефракції; нормальна; підвищена – викривлення променю більше, ніж при нормальній рефракції; критична – радіус кривизни дорівнює радіусу земної кулі; свехрефракція – радіус кривизни менше радіуса Землі. При критичній рефракції промінь при поширенні повністю огинає земну поверхню, а при свехрефракції промінь може кілька разів відбитися від землі, і сигнал в цьому випадку може поширитися на велику відстань.

Розсіювання радіохвиль в тропосфері. Радіохвилі, поширюючись уздовж земної поверхні, за рахунок явища дифракції долають відстань більше, ніж відстань прямої видимості. Це відстань залежить від довжини хвилі і розраховується по дифракційним формулами. Чим більше довжина хвилі, тим на більшу відстань поширюється радіохвиля. При цьому спостерігалися значні завмирання (ослаблення і посилення напруженості поля протягом декількох секунд) сигналу в точці прийому. Подальші дослідження показали, що відносно високий рівень сигналу утворюється за рахунок ефекту розсіювання радіохвиль в тропосфері, а завмирання пов'язані з флуктуаційними процесами в результаті віхребразного руху повітряних мас.

Якщо передавальну антену направити під невеликим кутом до горизонту, то основна частина енергії пройде через тропосферу і тільки мала її частина розсіється, тобто частково відіб'ється від локальних неоднорідностей тропосфери турбулентного походження.

При досить великої потужності передавача цієї енергії буде достатньо для прийому сигналу. Використовуючи передавачі підвищеної потужності (20-50 кВт) і гостронаправлені передають і прийомні антени, можна забезпечити надійний ра-

діозв'язок в діапазоні хвиль від 1 м до декількох сантиметрів на відстані до 1000 км, а іноді і на великі відстані.

1.3 Вплив природних умов та втрати на трасі в міліметровому діапазоні

У міліметровому діапазонах хвиль здійснюється передача багатоканальних повідомлень як наземними засобами передачі інформації – РРС, так і з використанням штучних супутників Землі. Завдяки вузьконаправленному випромінюванню та прийому, в них працює майже всі навігаційні і радіолокаційні системи, які дозволяють з високою точністю (до 5 см) визначати просторове положення різних об'єктів, випромінюючих і не випромінюючих електромагнітні хвилі. На дальність зв'язку в міліметровому діапазоні сильно впливає атмосферне згасання, пов'язане з поглинанням енергії радіохвиль молекулами різних речовин, в першу чергу води і кисню[4].

Локальний максимум ослаблення доводиться на частоту 60 ГГц, відповідну діапазону V-band. Частоти, діапазонів E-band та Q-band, навпаки, потрапляють в «вікна прозорості».

При поширенні радіовипромінювання ММХ загасає в атмосферних газах і гідрометеорах, це основна особливість використання для радіозв'язку (наземної, супутникової, а також для зв'язку літальних апаратів). При взаємодії випромінювання з середовищем виникають процеси розсіювання, ослаблення і деполяризації випромінювання, а також амплітудні і фазові спотворення сигналів. За тенденцією ослаблення радіовипромінювання в атмосфері можна спостерігати на майже на всіх діапазонах – зі зростанням частоти стабільність сильніше залежить від погодних умов. Однак на ММВ інтенсивність поглинання радіохвиль не настільки велика як в субміліметровому діапазоні хвиль і обумовлена наявністю молекул кисню і водяної пари на частотах 22,2 (H_2O), 60 (O_2), 118,8 (O_2) і 180 (H_2O) ГГц[4].

Пил, туман, дим і інші дрібнодисперсні суспензії з розміром частинок значно менше 3 мм не є перешкодою для хвиль міліметрового діапазону (довжина хвилі 3 мм відповідає верхній частотній кордоні виділених в даний час піддіапазонів). Завдяки цьому міліметровий діапазон є більш стійкий ніж наприклад оптичні системи.

Інтенсивні атмосферні опади це основною проблемою для радіотрас ММДХ. Найбільше загасання вносять зважені частинки, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі (одиниці міліметрів), що характерно для сильних злив і снігопадів(Рис 1.2)[2].

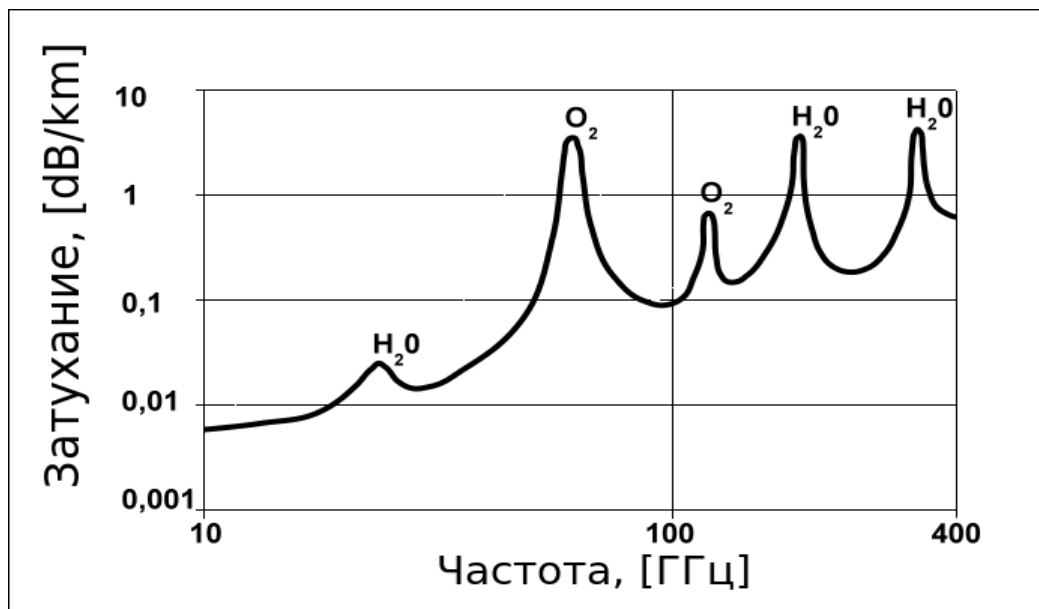


Рисунок 1.2 – Графік залежності загасання в атмосфері від частоти в діапазоні ВВЧ

Внаслідок цього земні радіосистеми міліметрового діапазону характеризуються малою дальністю дії (від десятків кілометрів до кількох десятків метрів) і сильною залежністю від погодних умов.

У діапазоні міліметрових радіохвиль з'являється додаткове поглинання, пов'язане з механізмом резонансної взаємодії радіохвиль з молекулами води і кисню на частотах, близьких до частот їх власних коливань. При заданному механізмі поглинання, енергія хвилі викликає зміну енергетичного стану молекул і атомів. Цей ефект має селективний (виборчий) характер. Строго кажучи, поглинання в газах може носити і нерезонансний характер, пов'язаний з подоланням сил «тертя» молекул, що володіють електричним і магнітним моментами і здійснюють вимушені коливальні рухи під дією поля хвилі.

Величину множника ослаблення радіохвиль в тропосфері можна представити у вигляді:

$$|V| = \frac{|E|}{|E_0|} = e^{-\int_0^r \alpha(r) dr}, \quad (1.1)$$

де E – напруженість поля в реальних умовах, E_0 – напруженість поля у вільному просторі, $\alpha(r)$ – множник ослаблення на одиницю довжини в кожній точці траєкторії хвилі, r – шлях, пройдений хвилею в тропосфері.

Множник ослаблення $\alpha(r)$ є суперпозиція двох величин: множника послаблення в газах – $\alpha_g(r)$ і множника послаблення в гідрометеорах – $\alpha_{gm}(r)$

$$\alpha(r) = \alpha_g(r) + \alpha_{gm}(r). \quad (1.2)$$

Вираз (1.1) з урахуванням (1.2) може бути представлено в децибелах:

$$|V|_{[дБ]} = -8.68 \int_0^r \alpha_g(r) dx. \quad (1.3)$$

Таким чином, сумарне ослаблення, виражене в децибелах, дорівнює сумі парціальних послаблень.

При проведенні кількісних оцінок величини ослаблення зазвичай використовують поняття погонного ослаблення, що має розмірність дБ / км. Так, для парів води і кисню множник ослаблення може бути представлений у вигляді:

$$|V_g|_{[дБ]} = Y_v \times r_v + Y_k \times r_k, \quad (1.4)$$

де Y_v Y_k – погонное ослаблення в парах води і кисню відповідно;

r_v r_k – ефективні довжини шляху радіохвилі в парах води і кисні відповідно.

Множник ослаблення в гідрометеорах:

$$|V_{gm}|_{[дБ]} = Y_d \times r_d, \quad (1.5)$$

де Y_d – погонное ослаблення в дощі,

r_d – ефективний шлях радіохвилі в дощі.

Очевидно, що ефективні довжини шляхів залежать від справжніх довжин і кута нахилу траєкторії радіохвилі по відношенню до площини горизонту.

Розрахункові значення погонного ослаблення в залежності від довжини хвилі (частоти) для парів води, кисню і дощу різної інтенсивності представлені на графіках рисунках (1.3) та (1.4) [3].

Графіки відповідають стандартному атмосферному тиску 760 мм. ртутного стовпа, температурі 20°C і вологовмісту 10 г / м^3 . На рисунку видно, що водяна пара має максимум поглинання на довжині хвилі 1.35 см (Частоті 22,23 ГГц), а кисень – на довжинах хвиль 0.5 і 0.25 см. (Частотах 60 ГГц і 120 ГГц).

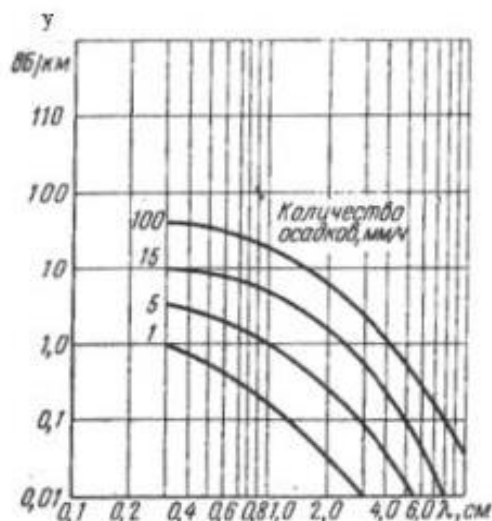


Рисунок 1.3 – Погонне ослаблення в дощі

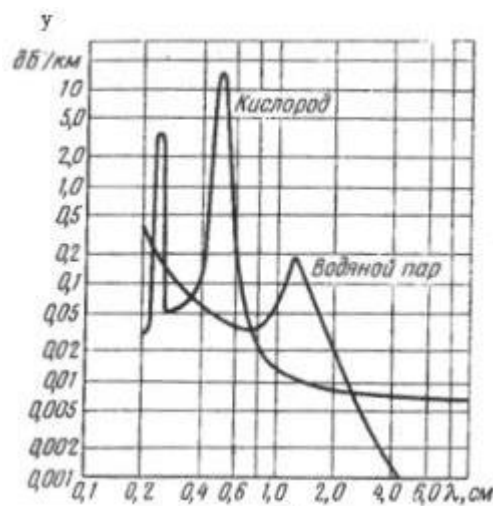


Рисунок 1.4 – Погонне ослаблення в парах води та кисню

В цілому ММДХ відноситься до хвиль зі змінною дальністю дії через порівняно велике молекулярного поглинання в парах води і кисню повітря, а також через ослаблення в різних гідрометеорах атмосфери.

З урахуванням статистики різних гідрометеорів, вологості повітря в атмосфері можна показати, що повне питоме ослаблення ММХ α в 99,98% часу в зазначених лініях поглинання не буде перевищувати значень, зазначених в таблиці. При цьому виникло припущення про те, що молекулярне поглинання і ослаблення в дощі і мокрий сніг впливає на поширення випромінювання одночасно, хоча це рідко має місце.

Таблиця 1.2 – Відношення повного ослаблення в атмосфері до довжини хвилі

Повне ослаблення в атмосфері	Довжина хвилі, мм			
	1,64	2,5	5,0	12,5
H ₂ O + O ₂ + дощ (10 мм/г)+ мокрий сніг (1мм/г), дБ/км α , км ⁻¹	55,6	52,0	31,7	12,0
	12,8	5,5	7,3	2,76

З даних таблиці 1.2[10] випливає, що на лініях молекулярного поглинання в діапазоні міліметрових радіохвиль можливе забезпечення роботи ліній широкосмугового зв'язку в наземних умовах на відстанях в декілька кілометрів.

Слід також підкреслити, що на хвилях 5 і 2,5 мм при помірній вологості атмосфери ($\sim 7,5$ г/м³) у земної поверхні повне ослаблення випромінювання при вертикальному поширенні радіохвиль в атмосфері в центрах ліній поглинання кисню може перевищувати 200 дБ. Це в свою чергу повністю виключає можливість несанкціонованого прийому інформації з комічних носіїв.

В даний час для більш протяжних ліній зв'язку становлять інтерес "вікна прозорості" атмосфери на частотах 35, 94, 140 і 220 ГГц, де спостерігається мінімальне загасання в порівнянні з сусідніми ділянками ММХ. На середніх широтах при помірній вологості і температури повітря в ясну погоду влітку у земної поверхні повне ослаблення невелика і при вертикальному поширенні через атмосферу на частоті 94 ГГц не перевищує 1,3 дБ.

Бездротовим радіоканалом, як засобу надійного високошвидкісного зв'язку слід подолати ряд проблем. Такі канали сприйнятливі до шумів, перешкод і іншим негативних чинників. У данному розділі дається характеристика змін потужності сигналу, викликаних втратами на трасі і екрануванням, в залежності від відстані. Втрати на трасі обумовлені розсіюванням потужності, випромінюваної передавачем, а також властивостями каналу поширення. Моделі втрат на трасі зазвичай припускають, що величина втрат визначається заданою відстанню між передавачем і приймачем (мається на увазі, що модель втрат на трасі не враховує ефекти екранування).

Екранування обумовлено наявністю перешкод між передавачем і приймачем, які послаблюють потужність сигналу за рахунок поглинання, відображення, розсіювання і дифракції. Якщо ослаблення сигналу дуже сильне, то сигнал блокується. Зміни прийнятої потужності через втрати на трасі проявляються на великих відстанях (100-1000 м), а зміни через екранування проявляються на відстанях, співвідносних з довжиною перешкоджаючого об'єкта (10-100 м на вулиці і менше всередині приміщення). Так як зміни прийнятої потужності через втрати і екранування на трасі проявляються на порівняно великих відстанях, то ці зміни іноді називають широко-масштабними ефектами поширення. Існують коливання прийнятої потужності, викликані конструктивними і деструктивними впливами складових багатопроменевого сигналу. Ці коливання відбуваються на дуже коротких відстанях, відносно довжини хвилі сигналу, і їх іноді називають дрібномасштабними ефектами поширення. На рис 1.5[7] в децибелах (дБ) показано зміну ставлення потужностей приймача і передавача в залежності від логарифма відстані при спільній дії втрат на трасі, екранування і багатопроменевого поширення.



Рисунок 1.5 – Зміна відносної потужності передавача в залежності від логарифма відстані при спільній дії втрат на трасі, пов'язаних з екрануванням та багатопроменевим поширенням радіохвиль.

В данному розділі було представлено особливості передачі інформації при використанні міліметрового діапазону. Ми розглянули основи фізичних процесів, які відбуваються при розповсюдженні хвиль різних діапазонів.

2 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ РОЗПОВСЮДЖЕННІ ХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

2.1 Втрати у вільному просторі та ослаблення сигналу в атмосферних газах

Існують дві групи механізмів поширення які впливають на розробку наземних LoS, в залежності від того чи здійснюють вони вплив на роботу. Здебільшого на траси на частотах нижче приблизно 10 ГГц, або довжиною більше кількох кілометрів будуть впливати багатопроменеві завмирання. Вони будуть основним механізмом, що викликає перерви в роботі. Проте на частотах вище 10 ГГц основною проблемою буде ослаблення в опадах. В силу своєї важливості, методи прогнозування статистики завмирань і ослаблення в наслідок цих механізмів і методи їх зниження розглядаються окремо в наступних розділах.

Втрати у вільному просторі в першу чергу викликаються тільки збіжністю променя, тобто тим, що при збільшенні відстані від джерела енергії сигналу поширюється по областям більшого розміру. Ці втрати можна визначити як ослаблення сигналу, яке спостерігалось б, якби вплив всіх процесів поглинання, дифракції, перешкод, заломлення, розсіювання і відображення було видалено настільки, щоб не надати ніякого впливу на поширення радіохвиль. Для розрахунку втрат у вільному просторі необхідно скористатися наступними рівняннями:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right), \quad (2.1)$$

де L_{bf} – втрати у вільному просторі,

d – довжина траси,

λ – довжина хвилі в тих же одиницях, що і d .

Вирішуючи рівняння (дБ) і використовуючи частоту замість довжини хвилі, одержимо рівняння 2.2.

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d, \quad (2.2)$$

де L_{bf} – основні втрати передачі у вільному просторі (дБ),

d – довжина траси (км),

f – частота (МГц).

Деяке ослаблення за рахунок поглинання в кисні і водяних парах присутній завжди, і має враховуватися при розрахунку загальних втрат при поширенні радіохвиль на частотах вище 10 ГГц. Ослаблення на трасі довжиною d (км) визначається за формулою:

$$A_a = \gamma_a d \text{ дБ.} \quad (2.3)$$

На трасах понад 10 км на частотах вище 20 ГГц, може виявитися бажаним врахувати відомі статистичні дані по щільності водяної пари і температури в безпосередній близькості від траси.

2.2 Дифракційні завмирання і ширина траси

Зниження градієнта заломлення (рефракції) атмосфери в вертикальному напрямку до

величини значно нижче за медіанне значення, рівного приблизно -40 N одиниць / км, може викликати викривлення шляху прямий хвилі в напрямку Землі. Якщо атмосфера досить "Субрефрактивна", хвиля буде зачіпати земну поверхню, приводячи до дифракційним втрат, які іноді також називають втратами через перешкоди або втратами внаслідок нерівностей Землі. Величина дифракційних втрат – визначає ширину траси.

Ефективний радіус Землі визначає величину відхилення заломлення, або визначається коефіцієнтом k . Щоб уникнути обчислення кривизни траси при проектуванні лінії, замість дійсного радіуса Землі може використовуватися ефективний радіус Землі. Якщо ми приймаємо таку геометрію, то різниця між трасою прямий хвилі і кривизною Землі стає постійною, і траса прямої хвилі може зображуватися прямою лінією, що допомагає виявити можливі перешкоди на профілі місцевості

або земної поверхні. Коефіцієнт k являє собою відношення ефективного і дійсного радіусів Землі, для стандартної атмосфери він має медіанне значення приблизно $4/3$, у випадках субрефракції він має більш низькі значення, і більш високі – в випадках суперрефракція, коли градієнт заломлення наближається до значення -157 N одиниць/км, коефіцієнт k прямує до нескінченності.

2.2.1 Основа методу прогнозування дифракційних втрат.

Можна скористатися формулою для визначення статистики дифракційних втрат. Вона була заснована на вимірах усередненої місцевості в США [17]. В цьому застосуванні передбачається, що ймовірність перевищення заданої глибини дифракційних замирань, дорівнює ймовірності того, не перевищено ефективний коефіцієнт k , даючи відповідне нормалізоване значення просвіту

$$h / F_1, \quad (2.3)$$

де h – це висота найбільш значного перешкоди на трасі,

F_1 – радіус першої зони Френеля.

2.2.2 Основа процедур визначення просвіту траси

Щоб визначити просвіт траси для основної антени і антени просторового рознесення були розроблені під час відсутності точної всесвітньої процедури просвіту траси, яка визначає допуск на дифракційні завмирання. Рис 2.1 заснований на вимірах трас, отриманих в помірно континентальному кліматі [15]. Прикладений до кривої малюнок для 99,9% залишається кілька невизначеним. З цього можна зробити висновок, що застосування величини ефективного коефіцієнта k , отриманої з кривих на рис 2.1, дає прийнятний просвіт для ліній без рознесення антен або ліній з основними антенами з просторовим рознесенням довжиною понад 45 км з радіусом $0,6 F_1$. Однак, як зазначається в Рекомендації МСЕ-R P.530[26], менші частки F_1 може бути прийнятні для частот менше 2 ГГц під уникнути неприпустимо великих висот антен. Для визначення присвятив трас на основі відомої величини дифракційних втрат були розроблені регіональні методи [15], і вони можуть служити основою в майбутньому для точної всесвітньої процедури.

Значення, k_e перевищує приблизно для 99,99% найгіршого місяця
(Помірний континентальний клімат)

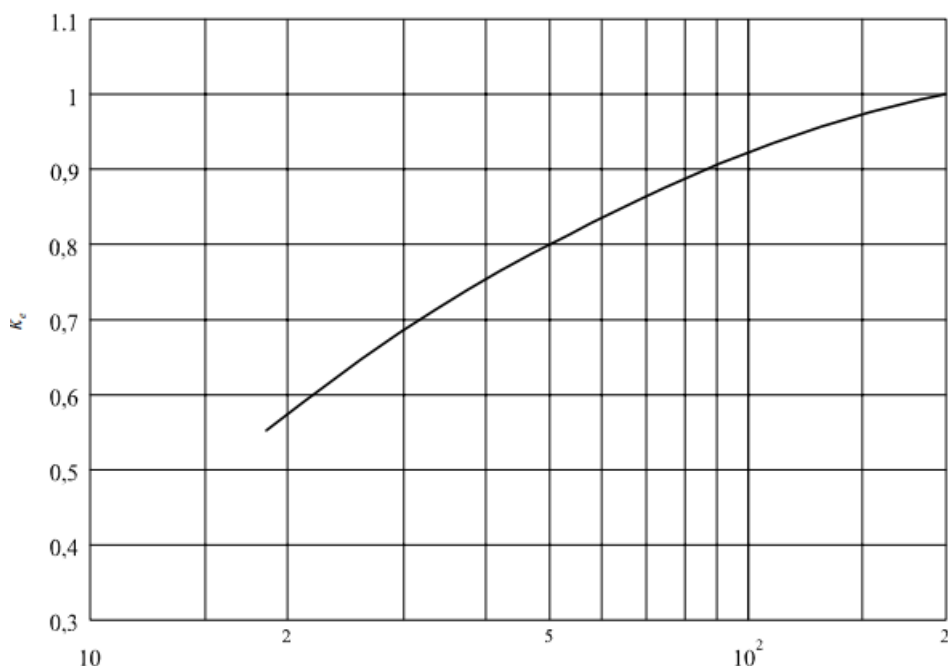


Рисунок 2.1 – Дані про поширення радіохвиль для проектування наземних ліній зв'язку пункту до пункту

Приклад розрахунку:

Параметри прикладу:

- довжина траси 30 км;
- клімат тропічний;
- робоча частота 15 ГГц;
- найбільш високе клиновидное перешкода розташоване в 10 км від передавача;
- висота найвищої перешкоди 30 м;
- доступні дані про медіанному значенні коефіцієнта k відсутні;
- очікуваний просвіт $1,0 F_1$;

Крок 1: Визначити висоту антени, необхідну для забезпечення відповідного медіанного значення коефіцієнта k (при відсутності будь-яких даних використовується значення $k = 4/3$) і просвіту $1,0 F_1$ над найвищим перешкодою (помірний і тропічний клімат):

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} = 17,3 \sqrt{\frac{10 \cdot 20}{15 \cdot 30}} = 11,5 \text{ м}, \quad (2.4)$$

Обчислення кривизни Землі в точці домінуючого перешкоди для $k = 4/3$, дає: $b = 11,8$ м при радіусі Землі $= 6360$ км. Припускаючи, що висоти підвісу передавальної і приймальної антен однакові, даний результат дає висоту антен вище, ніж $30 + 11,5 + 11,8 = 53,3$ м.

Крок 2: Отримати значення k_e (99,9%) з рисунка 1 для даної довжини траси.

З рисунка 1 легко отримати значення k_e :

$$k_e = 0,69, \quad (2.5)$$

Крок 3: Повторюємо наведені вище розрахунки для $k = k_e = 0,69$, кривизна Землі

$b = 22,8$ м. Значення $0,6 F_1 = 6,9$ м дає висоту антени дорівнює $30 + 6,9 + 22,8 = 59,7$ м.

Крок 4: Остаточним результатом вибираємо найбільше значення висоти антени $59,7$ м.

2.3 Сцинтиляційні завмирання

Турбулентні зміни показника заломлення можуть привести до амплітудних сцинтиляцій і змінам кута приходу сигналу. Ці ефекти присутні на всіх трасах прямий видимості на мікрохвильових частотах і вище, але можуть маскуватися багатопроменевими завмираннями і пов'язаними з ними явищами.

Різниця логарифма амплітуди сигналу через сцинтиляцій дана в [15]:

$$\sigma_x^2 = 45,25 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \int C_n^2(r) r^{5/6} dr, \quad (2.6)$$

де: σ_x – стандартна девіація логарифма прийнятої потужності,

λ – довжина хвилі (м), C_n^2 – структурна функція показника заломлення ($m^{-2/3}$),

r – відстань уздовж траси.

C_n^2 – є макроскопічним параметром, що змінюється в часі і просторі, в першу чергу зі зміною висоти. Протягом періодів часу тривалістю в десятки хвилин його значення на даній висоті можуть відрізнятися на кілька порядків. Найбільш високі C_n^2 знаходяться в планетарному прикордонному шарі, що тягнеться від поверхні на висоту від 1 до 2 км, в залежності від клімату в регіоні, пори року і часу доби. Типові значення знаходяться в діапазоні 10-14 до 10-12 [4], але можуть змінюватися від 10-25 до 10-10 ($m^{-2/3}$), [15].

Ефект амплітудної сцинтиляції надає більш значний вплив на супутникових лініях. Вимірювання [16] на частоті 7 ГГц, при кутах місця приблизно 3° показують флуктуації сигналу з рівнями від 0,1 дБ до приблизно 1 дБ, в залежності від кута місця і умов. на частоті 100 ГГц, рівні масштабуються по частоті і лежать, відповідно, між 0,4 дБ і 3,8 дБ.

2.4 Огляд механізмів поширення радіохвиль, пов'язаних з багатопроменевими Завмираннями

При нормальних умовах поширення радіохвиль, повинен бути тільки один шлях поширення між двома антенами на радіорелейної лінії прямої видимості. На практиці, для деяких відсотків часу може існувати кілька шляхів поширення (Багатопроменевість), і інтерференція сигналів, які прийшли за цими двома шляхами, може привести до значних завмирань.

Завмирання внаслідок багатопроменевого поширення є найбільш серйозним механізмом завмирань в умовах ясного неба. У зв'язку з тим, що багатопроменеві завмирання частотно-селективні, викликані ними перекручування на всіх рівнях амплітуди в широкосмугової цифрової лінії зв'язку зв'язок можуть бути основною причиною перерви в її роботі.

Механізми поширення радіохвиль, які призводять до серйозних завмирань і впливів на фазу сигналу на горизонтальних трасах і трасах з низьким кутом нахилу,

обумовлені умовами багатопроменевого поширення, в яких нормальному прямому сигналу створюються перешкоди від додаткових заважають променів.

Багатопроменеві умови поширення в цілому пов'язані з відображенням від:

- землі, води або інших поверхневих структур; або
- великих негативних величин градієнта заломлення в нижніх шарах атмосфери
- поєднань відображень від землі і шарів тропосфери.

При дослідженні явища замираний слід розрізнати повільні неселективні замирання, викликані впливом поширення радіохвиль по одній трасі, які також відбуваються в наслідок поширення в шаруватій атмосфері і пов'язані з формуванням каналів зв'язку і більш швидкими частотно-селективними замираннями, викликаними шарами з великим негативним градієнтом заломлення, розташованими нижче траси, і найбільш високими, в тому випадку, коли центр шару розташований трохи нижче траси [20]. Часто відбувається поєднання цих різних механізмів замирань.

2.5 Ослаблення в опадах

Ослаблення в дощових опадах уздовж траси поширення може бути розраховане шляхом інтегрування питомої ослаблення на довжину траси, якщо відома зміна інтенсивності дощу.

Інтенсивність дощу нерівномірна в просторі і часі. Моделі зміни опадів, які були розроблені для боротьби з цими складнощами, описані в Довіднику МСЄ "Радіометеорологія"[26]. Як відомо, дощові осередки часто накопичуються всередині дощових зон, іноді званих малою областю [11]. Записи дощомір показують короткі інтервали високої дощової інтенсивності в тривалі періоди слабкого дощу.

Радіолокаційні метеоспостережень показує малі області високої дощової інтенсивності, в великій області слабкого дощу. Отже, наземні лінії зв'язку протяжність. Більше 10 км можуть проходити через кілька дощових осередків всередині дощової зони. Крім того, при розрахунках ослаблення повинна бути прийнята до уваги перешкода, що виникає в зоні низької інтенсивності дощу, навколишнього

осередок. Протяжність цих зон збільшується зі зменшенням інтенсивності дощу і може досягати декількох кілометрів.

Основна відмінність методів, розроблених для прогнозування статистики ослаблення в дощі внаслідок вимірювань інтенсивності дощу, полягає в моделях, використовуваних для опису просторово-часової структури інтенсивності дощу.

Метод "штучного шторму" формує статистику ослаблення шляхом конвертації параметрів інтенсивності / часу, записаних в точці вимірювань в параметри інтенсивності / відстані, використовуючи швидкість перетворення дощової моделі, яку обчислюють як швидкість вітру [13].

Всі інші методи змушують використовувати сукупні розподілу інтенсивності дощу в точці вимірювань. Деякі методи обчислюють статистичні параметри дощу уздовж траси поширення, розглядаючи єдину осередок підходящої форми [12] або статистичний розподіл розмірів для осередків особливої форми [13]. інші методи характеризують статистичні параметри дощу, просто знижуючи коефіцієнт, який може бути обчислений з просторової кореляційно функції дощу або з вимірювань високошвидкісного дощомір, поширеного уздовж лінії [11] або з напівемпіричних закону [16] множення інтенсивності дощу в точці на цей коефіцієнт зниження дає еквівалент усередненої по відстані дощової інтенсивності.

Альтернативні процедури полягають в тому, щоб застосувати коефіцієнт зниження до фактичної довжині траси, на якому інтенсивність дощу може прийматися постійною [16]. Такого типу процедура в даний час прийнята в методології Рекомендації MCE-R P.530[26].

2.5.1 Основа методу прогнозування ослаблення в дощі

Процедура прогнозування ослаблення, прийнята в даний час в Рекомендації MCE-R P.530[26], була отримана з аналізу одночасного вимірювання інтенсивності дощу і поширення, отриманих головним чином в Європі, з деякими додатковими даними з Японії і Сполучених Штатів Америки. Вона використовує концепцію ефективної довжини траси, враховуючи параметри нерівномірності інтенсивності дощу вздовж дійсної траси. Метод заснований на обчисленні ослаблення, перевищує

протягом 0,01% часу ($A_{0.01}$), від інтенсивності дощу, перевищує протягом того ж відсотка часу ($R_{0.01}$). Для даного значення $R_{0.01}$ обчислюється питомий ослаблення, яке для отримання відповідного значення $A_{0.01}$ множиться на ефективну дину траси:

$$A_{0.01} = \gamma_R \cdot d \cdot \frac{1}{1+d/d_0}, \quad (2.7)$$

де: γ_R – питомий ослаблення,

d – довжина траси,

d_0 – еквівалентна довжина дощової осередки.

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

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0,12p^{-(0.546+0.043\log_{10}p)}. \quad (2.8)$$

Для ліній радіозв'язку, розташованих на широтах менш 30° (пн. ш. або пд. ш.):

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0,07p^{-(0.855+0.139\log_{10}p)}. \quad (2.9)$$

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

Крім того, так як метод використовує тільки одну точку розподілу інтенсивності дощу, він дає в результаті однакове розподіл ослаблення для двох місць з різними розподілами інтенсивності дощу, але з однаковим значенням $R_{0.01}$. Однак було відзначено, що розподілу ослаблення має тенденцію бути більш подібними один з одним, ніж розподілу інтенсивності дощу. У будь-якому випадку, точність, одержувана в методі передбачення для наземних ліній зв'язку, узгоджується з якістю і мінливістю доступних даних про інтенсивність дощу.

2.5.2 Питоме ослаблення

Питоме ослаблення γ_R (дБ / км) на даній частоті може бути отримано з інтенсивності дощу, впливає з відомого комплексного показника заломлення води при температурі дощових крапель, кінцевою швидкості і області розподілу дощових крапель [15]. Внаслідок несферічної форми крапель дощу горизонтально поляризовані хвилі схильні до ослаблення більшою мірою, ніж вертикально поляризовані хвилі [19.]. У деяких кліматичних областях різниця в ослабленні може досягати значень до 35% [18]. Питомий ослаблення для вертикальної і горизонтальної поляризації, для частот до 100 ГГц, може бути отримано з розширених розрахунків, які враховують несферичну форму крапель дощу [16].

Для практичного застосування ставлення між питомою ослабленням γ_R (дБ / км) і інтенсивністю дощу курсу R (мм / год), можна апроксимувати статечним законом [14]:

$$\gamma_R = k \cdot R^{\alpha}, \quad (2.10)$$

Беручи припущення сферичних крапель, значення k і α були розраховані для ряду частот в діапазоні від 1 до 1000 ГГц для декількох температур крапель і розподілів розмірів крапель [14].

Останні роботи представили результати комплексного дослідження про характер параметрів k , і α . Ці результати стали основою Рекомендації MCE-R P.838[23].

Дані про поширення радіохвиль для проектування наземних ліній зв'язку пункту до пункту. Значення коефіцієнтів k і α в діапазоні від 1 до 1000 ГГц визначаються як функції частоти f (ГГц) з рівнянь, які були виведені з підбору емпіричної кривої по статечним коефіцієнтам, отриманим в результаті розрахунків розсіювання.

Значення констант, що використовуються при розрахунку коефіцієнтів k_N , k_V , α_N і α_V , необхідних для розрахунку k і α , можуть бути отримані з Рекомендації MCE-R P.838[23].

Більш докладний опис взаємозв'язку між питомою ослабленням і інтенсивністю дощу наводиться в Довіднику MCE-R "радіометеорологія"[26].

2.5.3 Ефективна довжина траси

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

Коефіцієнт ослаблення траси визначається як:

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0}. \quad (2.11)$$

Дане рівняння отримано на основі двох припущень:

- просторову структуру дощу можна змодельовати еквівалентними дощовими осередками з прямокутним поперечним перерізом еквівалентної довжини d_0 в площині траси;
- дощові осередки з прямокутним поперечним перерізом можуть займати будь-яке положення щодо траси з однаковою ймовірністю.

Ефективна довжина траси $d_{eff} = d$ г відповідає середньої протяжності перетину наземної траси і довжини випадково розташованої еквівалентної дощової осередку d_0 , перевищує в 0,01% часу.

Довжина d_0 еквівалентної дощової осередку спочатку передбачалася постійною, але потім модель була поліпшена залежністю від інтенсивності дощу:

$$d_0 = 35e^{-0,015 \cdot R_{0,01}}. \quad (2.12)$$

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

Хоча це рівняння засноване на даних похилих трас з ослабленням в дощі, воно було успішно перевірено результатами вимірювань ослаблення в дощі на наземних лініях зв'язку.

2.5.4 Приклади застосувань

Місцезнаходження – Ріо-де-Жанейро, Бразилія; широта – 22 ° 50 'пн. ш.

довгота – 317 ° 00 'сх. д.; частота – $f = 13$ ГГц; довжина траси – $d = 20$ км; лінійна поляризація – $\tau = 90^\circ$.

Крок 1: Застосовуючи Рекомендацію MCE-R P.837[26] (карти інтенсивності дощу) для даного місця розташування, отримуємо $R_{0,01}=59,67$ мм / год для інтенсивності дощу, перевищує протягом 0,01% часу.

Крок 2: Питоме ослаблення γ_R обчислюється з використанням Рекомендації MCE-R P.838[23] для частоти, поляризації та інтенсивності дощу. В результаті γ_R одно 2,82 дБ / км.

Крок 3: Обчислення ефективної довжини траси проводиться як $d_{eff}=d \times r=20 \times 0,42=8,34$ км, що дозволяє обчислити оцінку ослаблення на трасі, перевищує протягом 0,01% часу:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = 23,4 \text{ дБ.} \quad (2.13)$$

На завершення, використовуючи формулу, яка відповідає лініях радіозв'язку нижче 30° , Ослаблення в дощі, яке перевищується протягом 0,001%, 0,01%, 0,1% і 1% часу, становить $A_{0,01}=33,9$ дБ, $A_{0,01}=23,4$ дБ, $A_{0,1}=8,5$ дБ і $A_1=1,6$ дБ, відповідно.

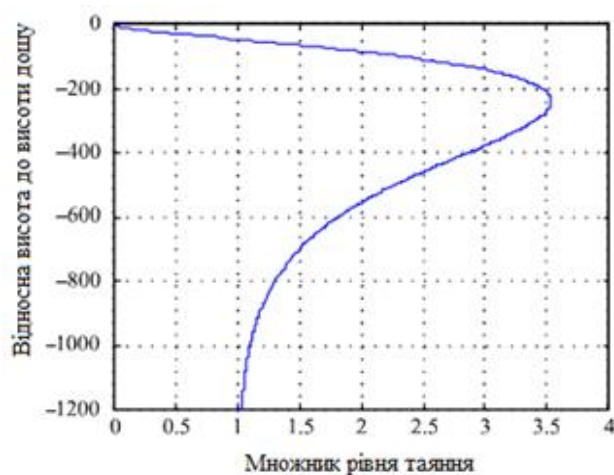
2.5.5 Прогнозування поєднання дощу і мокрого снігу

Метод з Рекомендації MCE-R P.530[26], заснований на припущенні, зробленому в 2002 році Vascon і Eden, і його подальшої розробки з наближеною реалізацією.

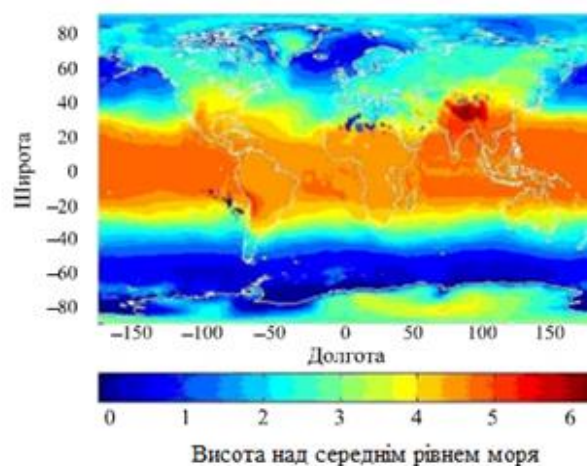
Цей метод використовує глобальну карту висоти дощу і непряму інформацію для оцінки кількості мокрого снігу, і середнього ослаблення профілю для отримання перевищення ослаблення на рівні танення. Крім того, він враховує певні розподілу висоти опадів або ізотерми нульового градуса, а також те, що перевищення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

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

Теоретичні коефіцієнти ослаблення встановлені для різних розмірів і форм частинок, а конкретні спрощені моделі встановили залежність ослаблення від частоти і поляризації, а також кута траси по відношенню до головної осі великих несферичних крапель дощу. Навпаки, частки мокрого снігу викликають значно серйозніші труднощі при моделюванні, але певні спроби зроблені. Теоретичний аналіз поширення радіохвиль через рівень танення використовує моделі плаваючих частинок льоду. Знайдено, що частинки мокрого снігу мають більший коефіцієнт ослаблення, ніж краплі дощу при однаковій кількості води, що викликає перевищення питомої ослаблення в порівнянні з дощем під час проведення останнього аналізу. У радіолокації використовується термін "яскрава смуга" через спостережуваного сильного радіолокаційного луни від цього рівня[21]. На додаток до ослаблення основної поляризації, анізотропний характер частинок мокрого снігу також може привести до деякої деполаризації.



(а)



(б)

Рисунок 2.2 – (а) Множник для оцінки додаткового ослаблення на рівні танення в порівнянні з дощем, (б) ізотерма при нулі градусів

Метод прогнозування для комбінованого дощу і мокрого снігу, представлений в даному документі, використовує спрощену апроксимацію. Множник вводиться

для опису того, відрізняється погонне ослаблення від ослаблення в дощі. Множник дорівнює 1 для дощу, і більше 1 для мокрого снігу, його максимум трохи перевищує 3,5 він дорівнює 0 для сухого льоду або снігу. Модель, зображена в рівнянні (18), графічно показана на рис 2.2(a)[3] множник представлений як функція від вертикального положення рівня танення щодо верхньої межі дощу.

Множник описується $\Gamma(h)$:

$$\Gamma(h) = \begin{cases} 0 & 0 < h \\ \frac{a(1 - e^{h/b})^2}{\left(1 + \left(1 - e^{-(h/c)^2}\right)^2 \left(a(1 - e^{h/b})^2 - 1\right)\right)} & h \leq 0, \end{cases} \quad (2.14)$$

де константи $a=4$, $b=70$, і $c=600$.

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

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

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

такі припущення:

- Рівень опадів відомий, наприклад, з карт в Рекомендації MCE-R P.837[26];
- Опади підрозділяються на дощ, мокрий сніг та сухий сніг або лід використовуючи висоту, як показано на карті в Рекомендації MCE-R P.839[24], і модель рівня танення аналогічна описаної вище;
- Розподіл ослаблення при поєднанні дощу і снігу таке ж, як розподіл для одного дощу.

Ключовий момент методу полягає у визначенні множника з урахуванням вкладу мокрого і сухого снігу. Якщо спостерігаються всі опади, цей множник дорівнюватиме 1, і не буде ніяких змін по порівняно з результатами застосування використовуваної сьогодні процедури. Однак, якщо все спостережувані опади присутні у вигляді сухого снігу або льоду, то множник дорівнює 0, і ослаблення оцінити неможливо. Цілком очевидно, що це відрізняється від існуючого методу. В реальних випадках, оскільки протягом року висота нуля градусів коливається, велика частина опадів буде випадати у вигляді дощу, з невеликою кількістю мокрого і сухого снігу. Ослаблення в мокрому снігу може бути значно більше, ніж в дощі. Таким чином, з огляду на всі можливості, ймовірно коефіцієнт буде більше 1, так що повинен бути дозволений деякий додатковий запас для мокрого снігу.

У процедурі повинні бути встановлені і використані дві функції: середня висота дощу, отримана з висоти ізотерми для нуля градусів, і її зміна або розподіл. Дані по висоті дощу наводяться в Рекомендації MCE-R P.839[24]. Дані про висоту рівня нуля градусів наведені на рис 2.4 (б). Передбачається, що висота дощу розподілена по нормальному закону при середньому нульовому значенні зі стандартною девіацій 800 м. В даний час приймається, один і той же розподіл для всього світу. Ослаблення A_p , яке перевищується протягом p відсотків часу, наведене в попередньому підрозділі, дійсно для ліній зв'язку, на трасах яких випадає тільки рідкий дощ. В Рекомендації MCE-R P.530[26] наведені покрокові процедури. На рис 2.3 показаний приклад процедури для окремих міст від екватора до Північного полюса. Для середнього року додаткове ослаблення через мокрого снігу оцінюється величиною до 10 дБ при $p = 0,001\%$.

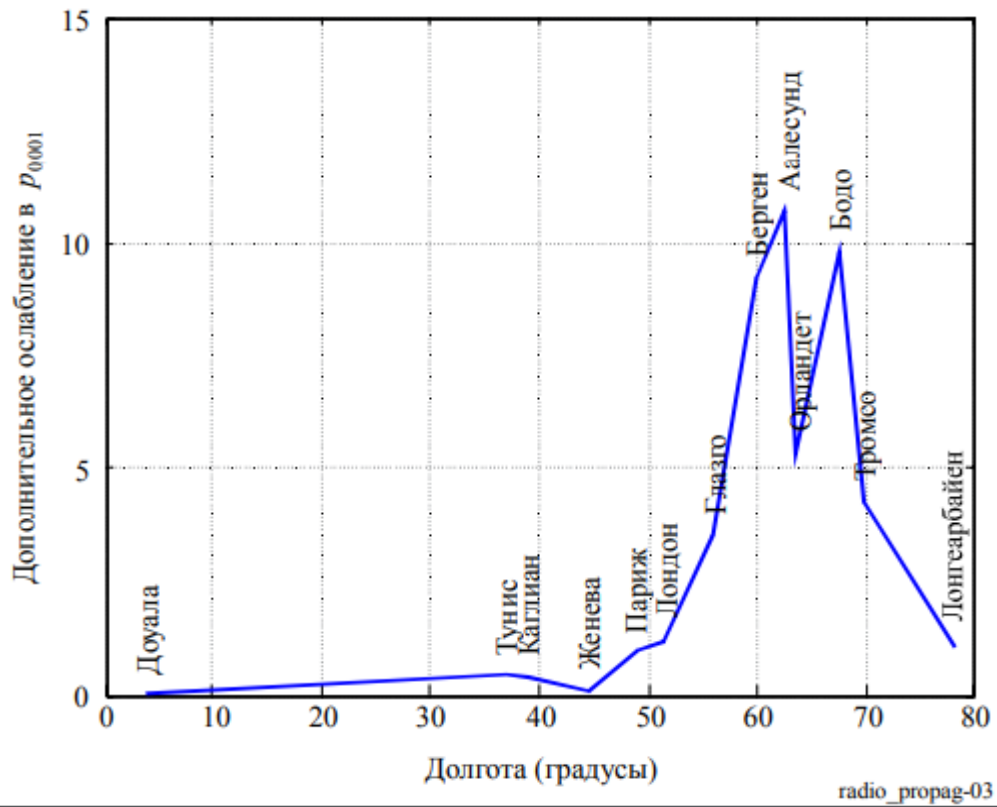


Рисунок 2.3 – Оцінка ослаблення в мокрому снігу, проведена для $p = 0,001\%$, середнього значення за рік для деяких міст від екватора до Північного полюса.

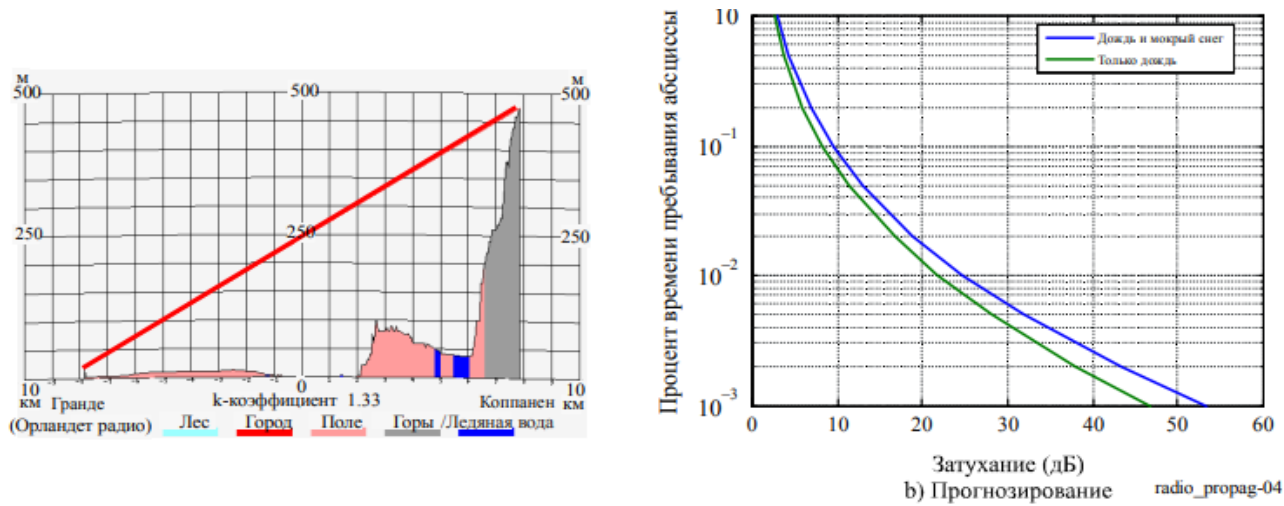


Рисунок 2.4 – Приклад прогнозування для прибережної лінії в Норвегії, де використовується усереднений коефіцієнт розмноження для похилих трас.

2.6 Довгострокове масштабування частоти і поляризації статистичних даних про ослабленні в дощі

2.6.1 Масштабування для однієї частоти

Якщо доступні тільки дані про ослаблення, виміряні на одній частоті, то може застосовуватися емпірична формула з Рекомендації МСЕ-R P.530[26], в якій коефіцієнт ослаблення наводиться як функція частоти і ослаблення, для частотного масштабування на тій же трасі в діапазоні частот від 7 до 50 ГГц (і умовно до 100 ГГц):

$$A_2 = A_1 \left(\Phi_2 / \Phi_1 \right)^{1-H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)}, \quad (2.15)$$

де:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1-10^{-4} f^2}, \quad (2.16)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55}. \quad (2.17)$$

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

Вважається, що ця формула найкраще емпірично підходить до доступним даним масштабування. Так як точність цієї процедури становить приблизно 10%, то, звичайно, коли з розрахунків доступні дані про довгострокове розподілі, повинна застосовуватися техніка частотного масштабування.

Більш докладно частотне масштабування розглянуто в Довіднику МСЕ-R "Радіометеорологія"[26], де в якості альтернативного наводиться метод, в якому використані константи k і α , і який тому краще підходить, коли потрібно масштабування поляризації. Деякі інші методи застосовують статистичні дані про ослаблення, отримані на двох частотах, або інформацію про кут місця для передбачення ослаблення на інший частоті.

2.6.2 Поляризаційне масштабування

Якщо доступні тільки дані про ослаблення, виміряні для однієї поляризації (вертикальної або горизонтальної), то для поляризаційного масштабування рівно можливих значень ослаблення в дощі в межах діапазону довжини траси і частоти методу передбачення ослаблення можуть застосовуватися рівняння (37) і (38) з Рекомендації MCE-R P.530 [26].

Поляризаційне масштабування має застосовуватися тільки до результатів вимірювань або обчислень ослаблення через дощ. Слід додати додаткове ослаблення через поглинання в газах. Вирази, наведені в Рекомендації MCE-R P.530[26], є загальним угодою з результатами експериментів і з припущеннями, що використовують певні коефіцієнти ослаблення з Рекомендації MCE-R P.838[23]:

$$A_V = \frac{300A_H}{335+A_H} \quad \text{дБ}, \quad (2.18)$$

де:

$$A_H = \frac{335A_V}{300-A_V} \quad \text{дБ}. \quad (2.19)$$

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

2.7 Статистичні дані тривалості і коефіцієнта завмирання, викликаного дощем

Процедури визначення статистичних даних тривалості завмирань, викликаних дощем, можна знайти в Рекомендації MCE-R P.530[26].

Хоча поки що є мало інформації по загальному розподілу тривалості завмирань, існують деякі дані і емпіричні моделі для певних статистичних даних, наприклад, середній тривалості події ослаблення і деяких таких випадків. Видимий різниця між усередненими і середніми значеннями вказує, однак, на асиметрію загально-

го розподілу тривалості. Також існує вагомий доказ того, що тривалість випадків замирання в умовах дощу набагато більше, ніж в умовах багатопроменевого поширення.

Подія ослаблення визначається тут як перевищення рівня ослаблення A протягом заданого періоду часу (наприклад, 10 с або більше). Співвідношення між числом подій ослаблення $N(A)$, середньою тривалістю $D_m(A)$ таких подій і загальним часом $T(A)$, протягом якого рівень ослаблення A перевищується довше деякої заданої тривалості визначається як:

$$N(A) = \frac{T(A)}{D_m(A)}. \quad (2.20)$$

Загальний час $T(A)$ залежить від визначення події. Дана подія, зазвичай представляє інтерес для використання в статистиці, - це подія ослаблення A , триваюче 10 с або більше. Проте, події меншою тривалості, наприклад, використовуваний в експерименті інтервал вибірки тривалістю в 1 с, також представляють інтерес для визначення відсотка загального часу простою, обумовленого неготовністю, тобто загального часу подій, які тривають 10 с або більше.

Число подій замирань, що перевищують рівень ослаблення A протягом 10 с або більше, може бути представлено так:

$$N_{10\text{ s}}(A) = a A^b, \quad (2.21)$$

де a і b - коефіцієнти, які, ймовірно, залежать від частоти, довжини траси і інших змінних факторів, наприклад, клімату.

На основі одного набору вимірювань для траси довжиною 15 км на частоті 18 ГГц на Скандинавському півострові, значення a і b , які оцінюються для однорічного періоду, рівні:

$$a = 5,7 \times 10^5, \quad b = -3,4. \quad (2.22)$$

Після того як з рівняння (2.21) було отримано значення $N_{10\text{ s}}(A)$, середня тривалість події замирань, що становить 10 с або більше, може бути обчислена за допомогою інвертирования рівняння (2.20).

Грунтуючись на зазначеному наборі вимірювань, виконаних на Скандинавському півострові для траси довжиною 15 км на частоті 18 ГГц, 95% -100% всіх подій

дощу, що перевищують приблизно 15 дБ, можуть бути приписані неготовність. При такій відомій частці подій готовність може бути отримана шляхом множення цієї частки на загальний відсоток часу, коли дане ослаблення A перевищується, як визначено за методом, представленим у Рекомендації МСЕ-R P.530[26].

2.8 Сезонні коливання – найгірший місяць

Системне планування часто вимагає, щоб значення ослаблення перевищувались процентним ставленням часу P_W "гіршого місяця" (див. Рекомендацію МСЕ-R P.581[26]).

Перехід від щорічних статистичних даних до статистичних даних "гіршого місяця" детально обговорюється в Рекомендації МСЕ-R P.841[26]. Співвідношення між P_W і річним процентним ставленням часу, P , можна висловити як:

$$P = Q_1^{\frac{1}{1-\beta}} P_W^{\frac{1}{1-\beta}}, \quad (2.23)$$

Наведене вище вираз можна застосувати до діапазону ймовірностей (0,001% P <3%). В Рекомендації МСЕ-R P.841[26] вказані значення Q_1 і β , знайдені в різних місцях і для декількох впливів поширення. Для цілей глобального планування може бути краще окреме "усереднене" ставлення, що використовує $Q_1 = 2,85$ і $\beta = 0,13$, яке дає:

$$P = 0,3 P_W^{1,15}, \quad (2.24)$$

Результати вимірювань, отримані в різних кліматичних зонах, показують, що співвідношення щорічного усередненого відсоткового відношення часу гіршого місяці до усередненого щорічного процентному відношенню часу частково залежить від клімату. Наведене вище рівняння відповідає кліматичним зонам з відносно невеликими сезонними коливаннями в інтенсивності опадів. Для Середземноморської і Північно-Західної Європи та інших регіонів, показують схожі сезонні коливання в опадах, вказане вище значення P повинне бути зменшено на 20%, а для більш граничних випадків це значення P потрібно зменшити на 30%.

2.9 Обговорення оцінки моделі (випробування)

В Рекомендації МСЕ-R Р.311[26] представлені критерії випробувань для порівняння методів прогнозування, включаючи визначення змінної випробування для порівняння передбачень ослаблення в дощі.

В результаті всебічних випробувань, проведених на основі доступних методів і даних, було запропоновано прийняти метод з п. 2.4.1 Рекомендації МСЕ-R Р.530[26] і з'ясувалося, що досяжна точність становить приблизно 25% -30% на загальній основі для процентного відношення часу 0,001% і 0,1%. Довгострокові статистичні дані, особливо з тропічних регіонів, потрібні для поліпшення точності прогнозування.

Для процентного відношення часу, що перевищує 0,1%, слід нагадати, що результати вимірювань інтенсивності дощу будуть стрімко ставати неточними, тому що зменшуються показники дощу. Зокрема, в таких процентних відносинах часу газове поглинання може стати обов'язковим для розгляду, і його слід додати для прогнозування ослаблення в дощі.

2.10 Приклад обчислень

Як приклад буде розраховано розподіл ослаблення в дощі для лінії зв'язку зі наступними характеристиками:

робоча частота – 18 ГГц, широта середньої точки – 12 ° 00 '00 ", довгота середньої точки – 44 ° 00 '00 ", довжина траси – 10 км, поляризація – вертикальна.

Етап 1: Коефіцієнт дощу $R_{0.01}$, перевищує протягом 0,01% часу (згодом інтеграції 1 хв) повинен бути отриманий, переважно, з місцевих джерел довгострокових вимірювань.

Якщо вони недоступні, середній показник можна отримати з інформації, зазначеної в Рекомендації МСЕ-R Р.837[26]. У цій Рекомендації представлені малюнки для швидкого обчислення $R_{0.01}$, а за допомогою методу для більш точного обчислення цього параметра в цьому випадку виходить значення $R_{0.01}=50$ мм/год. Слід

зауважити, що хоча вказується на застосування географічних координат середньої точки лінії зв'язку, використання координат однієї з її крайніх точок не приведе до серйозної помилки при обчисленні.

Етап 2: За допомогою Рекомендації МСЕ-R P.838[23] обчислюється особливе ослаблення, γ_R (дБ / км).

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k, \quad (2.25)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha, \quad (2.26)$$

де: f – частота (ГГц), k – або κ_H або κ_V , α – або α_H або α_V .

Коефіцієнти a_j , b_j , c_k , m_k , c_k і m_α вказані в Рекомендації МСЕ-R P.838[23]. Коефіцієнти k і α можуть мати горизонтальну (H) або вертикальну поляризацію (V). За допомогою цих рівнянь можна отримати значення для вертикальної поляризації α (18 ГГц) = 1,002505 і k (18 ГГц) = 0,077076. Особливу ослаблення становить:

$$\gamma_R = k R_{0.01}^a = 3,89 \text{ дБ/км}. \quad (2.27)$$

Етап 3: Обчислення ефективної довжини траси d_{eff} :

$$d_0 = 35 \exp(-0,015 R_{0.01}) = 16,53 \text{ км}, \quad (2.28)$$

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} = 0,623, \quad (2.29)$$

$$d_{eff} = d \cdot r = 6,26 \text{ км}. \quad (2.30)$$

Етап 4: Вычисление ослабления на трассе, превышающее 0,01% времени:

$$A_{0.01} = \gamma_R d_{eff} = 24,2 \text{ дБ}. \quad (2.31)$$

Етап 5: Переклад для інших процентних відносин часу:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = 0,12 p^{-(0.546 + 0.043 \log_{10} p)}. \quad (2.32)$$

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку.

p (%)	A_p (дБ)
1	2,9
0,1	9,2
0,01	24,2
0,01	51,7

Етап 6: Якщо необхідні статистичні дані за найгірший місяць, виробляються обчислення річного процентного відношення часу p , відповідного процентному відношенню часу гіршого місяця p_w за допомогою інформації про клімат, зазначеної в Рекомендації МСЕ-R P.841[26]. З метою глобального планування:

$$p(\%) = 0,30 p_w(\%)^{1.15}. \quad (2.33)$$

Таблиця 2.2 – приклад обчислень:

p_w (%)	p (%)	A_p (дБ)
1	0,3	5,5
0,1	0,021	18,1
0,01	0,0015	45,9

2.11 Спаренні і траси які сходяться

2.11.1 Корельовані завмирання на транзитних трасах

Загальна продуктивність передачі для спарених систем у великій мірі залежить від характеристик поширення на окремих лініях. Для визначення ймовірності довгих прольотів і малих перерв зв'язку ймовірність спільних замирань в двох або більше прольотах незначні. При цих умовах загальна ймовірність перерви зв'язку

для ланцюжка спарених ліній. буде дорівнює сумі ймовірностей перерви зв'язку для окремих ліній зв'язку, як зазначено в Рекомендації MCE-R P.530[26]:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (2.34)$$

де P_i – ймовірність появи завмирання на i -му прольоті радіолінії, що складається з n прольотів.

Для коротких прольотів (порівнянних з розмірами структури ослаблення в дощі), сусідні канали будуть порушені одночасно, приводячи до загальної ймовірності перерви зв'язку менше суми окремих ймовірностей. Як вказується в Рекомендації MCE-R P.530[26]:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i. \quad (2.35)$$

де K – коефіцієнт перетворення, що враховує загальний ефект кореляції між виникненням дощів.

Вимірювання в Японії на ланцюжку ліній зв'язку довжиною 4,5 км показали цю умову. при ймовірності перерви зв'язку в окремій лінії зв'язку 0,03%, спостерігалось зменшення числа переривати на коефіцієнт приблизно 0,8 для перерви зв'язку на двох прольотах, і 0,7 - для чотирьох прольотів [19].

Обчислення на основі функції просторової кореляції для дощу, отримані на широко рознесених точках в Канаді, показують, що подібні фактори зменшення застосовні для великих протяженностей прольоту, що складаються з десяти послідовних прольотів довжиною від 10 до 20 км кожний. Для ще більших довжин прольоту одночасне завмирання важливо тільки в випадку великих ймовірностей події.

На основі цих експериментів і обчислень в Рекомендації MCE-R P.530[26] представлені графіки коефіцієнта модифікації K , в функції від числа прольотів рівної довжини для трас різних протяженностей і для різного процентного відношення часу, що враховує довжину траси, рівну 4,6 км.

2.11.2 Траси що сходяться

Інформацію про коефіцієнт поліпшення за рахунок рознесення для сходяться трас в діапазоні КНЧ спектра можна знайти в Рекомендації MCE-R P.1410[26]. Хоча

цей коефіцієнт виведений для застосувань з пункту в зону, його можна використувати в цілях отримання деякої загальної картини поліпшення, забезпечується такими елементами мережі з рознесеними (або об'єднаними) маршрутами "пункту до пункту".

Внаслідок довільного тимчасового і просторового розподілу інтенсивності дощу, сходяться лінії з пункту в пункт будуть в кожен момент часу відчувати замирання різної глибини. В результаті може спостерігатися погіршення ставлення сигнал / перешкода між лініями від користувачів в різних кутових секторах, коли корисний сигнал послаблюється на трасі за рахунок дощу, а заважає сигнал не послаблює.

Диференціальне кумулятивний розподіл величини ослаблення в дощі для двох сходяться ліній, що працюють на одній і тій же частоті, може бути обчислено за формулою:

$$A_{12}(p) = [A_1(p) - 0,34A_2(p)](2,65|\theta|^{0,23} + 0,004|\Delta d|^{2,25})f^{0,4} \text{ дБ}, \quad (2.36)$$

де p – відсоток часу між 0,01% і 1%, f – частота (ГГц), Δd – різниця довжин трас (км), θ – кут (рад) між лініями від 0° до 180° .

$A_1(p)$ і $A_2(p)$: значення ослаблення в дощі на окремих лініях, що перевищують протягом $p\%$ часу, розраховані з використанням методу, наведеного в Рекомендації MCE-R 530[26].

2.12 Траси з пасивними ретрансляторами

В Рекомендації MCE-R P.530[26] наведені процедури для розширення однопролетових процедур для трас з пасивними ретрансляторами з двома або більше прольотами на основі роботи Карла і Перссона.

У разі плоских відбивачів процедура проста і полягає в тому, що потрібно вставити загальну довжину траси в рівняння (2.33) для коефіцієнта зменшення відстані зі згаданої Рекомендації. Цей підхід є найбільш точним, якщо прольоти приблизно паралельні один одному. Відхилення прольотів від паралельних матиме загальний вплив, збільшуючи однаковість дощу по всій трасі, так як відстань між кінцевими

ми точками зменшується в відповідно до розміру дощової осередки. Це, в свою чергу, викличе ослаблення, яке буде недооцінене, так як коефіцієнт зменшення теж буде недооцінений. недосліджений підхід для зразкового усунення цього впливу наведено в згадуваній вище Рекомендації.

У разі використання на прольотах ретрансляторів з двухзеркальної антеною однаковою поляризації, процедура ідентична процедурі для плоского відбивача. для змінних вертикальних і горизонтальних поляризацій ослаблення розраховується по всій трасі для однієї поляризації, а потім для іншої, потім обчислюється просте зважене середнє на основі реальної довжини траси для кожної поляризації.

2.13 Спотворення, обумовлені поширенням

Головною причиною спотворення на лініях прямої видимості в УВЧ і СВЧ діапазонах є частотна залежність амплітуди і групового часу запізнювання в умовах багатопроменевого поширення у вільному просторі. Таке спотворення, яке зазвичай називається частотно-виборчими завмираннями, посилюється із зростанням смуги пропускання системи і залежить від амплітуди і відносної затримки передачі між передавачем і приймачем на окремих трасах. спотворення, зумовлені многолучевою, швидше за все, буде обмежуючим фактором для цифрових радіоліній високої пропускну здатності, що працюють на частотах нижче 15 ГГц[16]. На більш високих частотах повинні враховуватися також спотворення, обумовлені многолучевою. Однак слід враховувати, що зазвичай вплив атмосферних опадів набагато вище. У цій главі описуються як ці дії, так і моделі каналів для визначення продуктивності системи через частотноізбірального завмирання.

2.14 Моделі багатопроменевого поширення

Метод передбачення продуктивності через багатопроменеве поширення (МР) складається з:

- моделі МР,
- моделі статистичної випадку МР,
- моделі того, як обладнання може чинити опір МР.

Багатопроменеве поширення зазвичай описується в вигляді двох або більше роздільних променів, отриманих з-за амплітуди і затримки, і об'єднаних в приймальному. Кількість променів іноді може бути великим, але глибокі завмирання відбувається, коли два промені сумірною амплітуди згубно додаються. Цілком припустимо, що глибокі завмирання (і частотно-виборчі завмирання) зазвичай викликаються одним єдиним променем, що приходять з помітною затримкою і доданим до інших променів, які прийшли раніше[17].

Комплексна функція передачі радіоканалу для фізичної багатолучевої моделі виглядає так:

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^N C_k \omega^k, \quad (2.37)$$

де коефіцієнти C_k можуть бути реальними або комплексними.

2.15 Параметричні моделі

Інший підхід полягає в описі спотворень в радіоканалі за допомогою параметричного вираження різниці амплітуд. Різниця амплітуд на двох окремих частотах використовується для характеристик спотворення амплітуди. Цей метод в цілому називається методом лінійного амплітудного спотворення (LAD). Також можуть застосовуватися дві фіксовані частоти, переважно на рівній відстані від центру радіоканалу, т. е. внутріполосне амплітудне спотворення (IBAD)[17]. В якості альтернативи дві частоти можуть відповідати точкам максимальною і мінімальною глибини завмирань на рівні вільного поширення, визначаючи спотворення потужності всередині смуги (IBPD).

2.16 Розрахунок якісних показників

Традиційний метод розрахунку часу перерви зв'язку для аналогових систем заснований на концепції завмирання в одній частоті і тому безпосередньо непридатний до цифрових систем радіоліній високої пропускної здатності. Розширення рамок завмирання, які в аналогових системах матимуть схильність до зниження впливу теплового шуму, не поліпшить продуктивність цифрових систем, якщо частотно-виборчі завмирання вже звернуло амплітуду Глазкової діаграми до нуля.

Для застосування моделей поширення в розрахунках продуктивності для цифрових систем високої пропускної здатності необхідно мати статистичні описи того, як всі різні параметри працюють під час багатопроменевих завмирань. Це питання можна розділити на дві частини: характеристику природи довільних флуктуацій в моделі функції багатопроменевої передачі, в ідеалі, як багатовимірне спільне можливе поширення; виклад способу, в якому параметри цього поширення залежать від фізичних властивостей радіоканалу, наприклад, довжини траси, радіочастоти, відхилення траси, клімату і т. д.

Будучи об'єднано зі статистикою для можливості виникнення завмирання, це дозволить безумовне спільне можливе поширення для параметрів, що визначають поведінку системи. Повний набір параметрів для багатопроменевої моделі може розглядатися, як розміри багатовимірної поверхні. Перерва в роботі з'являється, коли ці параметри знаходяться в певній критичній області багатовимірної поверхні.

Перерва в роботі цифрової радіосистеми може бути передбачений за допомогою різних методів, наприклад:

- метод запасів на завмирання;
- метод кривої сигнатури;
- метод, який використовує статистику LAD.

2.16.1 Метод кривої сигнатури

Метод кривої сигнатури - не єдиний метод, так як існує безліч різних підходів.

Цей розділ містить основні принципи методу і кілька прикладів рішень. Більш детально він описаний в Довіднику МСЕ-R "Цифрові радіорелейні системи"[26].

Імовірність перерви зв'язку ($KOB > 10^{-3}$), Викликаного багатопроменевим завмиранням (P), може бути розрахована з ймовірності перерви зв'язку з-за частотно-виборчого завмирання (P_s) і ймовірності перерви зв'язку через теплового шуму (P_f) за допомогою наступного рівняння:

$$P = (P_f^{\frac{\alpha}{2}} + P_s^{\frac{\alpha}{2}})^{2/\alpha}. \quad (2.38)$$

P_f може бути обчислено, як зазначено в Рекомендації МСЕ-R P.530[26].

Імовірність перерви зв'язку через частотно-виборчих завмирань визначається твором

ймовірності багатопроменевих завмирань η і ймовірності перерви зв'язку, отриманого при міжсимвольних перешкодах під час багатопроменевих завмирань:

$$P_s = \eta \cdot (P_s|_{MP}). \quad (2.39)$$

Імовірність багатопроменевих завмирань η може бути пов'язана з фактором виникнення глибоких замирань P_0 або з параметрами статистичного розподілу паралельного повільних замирань. Одне із запропонованих рівнянь має вигляд:

$$\eta = 1 - e^{0,2 P_0^{3/4}}. \quad (2.40)$$

Останній доданок може бути засноване на спрощеній трипроменевою моделі або на двопротеневий моделі. Імовірність перерви зв'язку визначається шляхом інтегрування функції розподілу загальної щільності випадкових змінних, визначених моделлю каналу по критичної області простору ймовірності. При обчисленні слід припустити ймовірне розподіл для різних параметрів, наприклад відносна затримка відлуння τ , відносна амплітуда луна-сигналу k і частота режекції f_0 . Зазвичай перерву зв'язку описується із застосуванням рівняння 2.41.

$$P_S|_{MP} = \int_0^{\infty} p(\tau) d\tau \int_{-1/2\pi}^{1/2\pi} \phi_0 d\phi \int_D p(k) dk, \quad (2.41)$$

де C – постійний коефіцієнт, W – ширина сигнатури (МГц), λ_a – середня критична висота сигнатури, τ_t : еталонна затримка для λ_a (нс), $P_b(1)$ – значення функції ймовірності щільності, відповідне амплітуді $b = 1$, $\{\tau^2\}$ – Момент другого порядку розподілу пов'язаної з луною затримки ($= 2\tau_m^2$) для динамічного розподілу $i = \mu^2 + \nu^2$ (Для гауссовського розподілу), τ_m – середня затримка для траси, яка пов'язана з довжиною траси і діаграмою спрямованості антени.

Для функції розподілу ймовірності амплітуди відбитого сигналу $P_b(b)$ були запропоновані різні припущення: однакове, експоненціальне, і Релеєвське-порелеєвського функції розподілу щільності ймовірності мінімуму частоти $P_{f_0}(f_0)$ є рівномірною.

Для $p(\tau)$ маються на увазі два різних види розподілу затримки відбитого сигналу. У першому випадку затримка відлуння τ має негативне експоненціальне розподіл із середнім значенням τ_m , яке залежить від довжини траси. Наступне емпіричне співвідношення між τ_m (нс) і d (км) застосовується для трас без сильного відображення від поверхні:

$$\tau_m = \tau_{m0} \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^n, \quad (2.42)$$

де значення n знаходиться в діапазоні від 1,3 до 1,5, а τ_{m0} є середньої відносної затримкою для стандартного траси в 50 км.

У другому випадку мається на увазі Гаусове розподіл із середнім μ і змінним ν^2 . ці параметри можуть вибиратися незалежно, дозволяючи більш точну підгонку до вимірюваних (або розраховується) функцій щільності для окремих інтервалів, які дозволяє єдиний параметр експоненційної щільності. За відсутності будь-якої інформації, що відноситься до інтервалів, модель має на увазі:

$$\mu = 0,70 (d/50) \text{ нс}, \quad (2.43)$$

$$\nu = 0,49 (d/50)^2 \text{ нс}^2. \quad (2.44)$$

Гауссовское розподіл включає в себе і позитивну і негативну затримку.

Наближене значення для перерви зв'язку через частотно-виборчого замирання можна отримати за допомогою прямокутної апроксимації для сигнатури. У такому випадку може бути використане таке рівняння:

$$P_{S/MP} = \frac{C \cdot W \cdot 10^{-B/20} \cdot \tau_m}{\tau_r}, \quad (2.45)$$

де B – глибина сигнатури, W – ширина сигнатури, C – константа, τ_r – еталонна затримка сигнатури, τ_m – середня затримка.

Розрахунки слід проводити, виходячи з відносної частоти мінімальної фази і умови не мінімальної фази, і розраховуючи ймовірність перерви зв'язку окремо, коли сигнатури для мінімальної і не мінімальної фаз розрізняються.

приклад обчислень: місце Пекін, Китай; широта: $39^\circ 55'$ пн. ш.; довгота: $116^\circ 25'$ східної довготи. д.; частота: $f = 2$ ГГц; довжина траси: $d = 80$ км; висота передавальної антени: $h_t = 100$ м; висота антени приймача: $h_r = 55$ м.;

Крок 1: Розрахувати середній час затримки по формулі:

$$\tau_m = 0,7 \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^{1,3} = 1,29 \text{ нс}, \quad (2.46)$$

Крок 2: Необхідно розрахувати параметр многолучевой активності η . Значення η є функцією pw і, в цьому випадку, $\eta = 0,267$.

Крок 3: Припустимо, що формат модуляції має вигляд 8-PSK. Згідно Рекомендації MCE-R F.1093, стандартний параметр системи для цієї певної модуляції дорівнює $K_n = 7$. Слід помітити, що K_n залежить від ширини і глибини сигнатури, а також від еталонної затримки.

Крок 4: Припускаючи, що використовується той же стандартний параметр системи для замираний мінімальної фази і не мінімальної фази, отримуємо K_n , $M = K_n$, $NM = 7$ і значення $T = 105$ нс для періоду бода (відповідає звичайній швидкості передачі в бітах), ймовірність виборчого перерви зв'язку можна розрахувати за формулою:

$$P_S = 2,15\eta(K_{n,M} + K_{n,NM})\frac{\tau_m^2}{T^2} = 0,0012, \quad (2.47)$$

В данному розділі було глибоко розглянуто які фізичні процеси відбуваються при поширенні хвиль міліметрового діапазону. Ми продемонстрували приклади розрахунку більшості методів що використовуються при моделюванні тих чи інших радіомостів.

3 АПАРАТУРНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАУКОВО-ПРИКЛАДНОЇ РАДІОМЕТРІЇ АТМОСФЕРИ

3.1 Постановка задачі

Апаратурно-методичне забезпечення методу радіометрії дає можливість отримувати дані про радіояскравісну температуру (T_b) атмосфери і потім відновлювати значення оптичної товщини атмосфери (τ) і повного вертикального поглинання радіохвиль.

Обидві ці величини T_b і пов'язані добре відомим виразом для низхідного радіо-теплового випромінювання атмосфери:

$$T_b = T_{\text{eff}} (1 - e^{\tau \sec \theta}), \quad (3.1)$$

де T_{eff} – це ефективна температура атмосфери, θ – зенітний кут візування антени радіометра.

«Знання величини повного вертикального поглинання радіохвиль на різних частотах дозволяє визначати різноманітні фізичні параметри атмосфери і деяких її складових» [1]. Відновлення фізичних параметрів атмосфери за даними дистанційного зондування (ДЗ) методами радіометрії в міліметровому діапазоні хвиль (ММ ДХ) має практичний і науковий інтерес для метеорології, кліматології, досліджень фізики хмар, штучного придушення і стимуляції опадів. Ці методи досить добре розвинені і знайшли широке практичне застосування в світі за останні кілька десятиліть.

Однак, в останні роки з'явилися нові пріоритетні напрямки та завдання прикладного характеру, а також ряд нових можливостей у розвитку апаратного забезпечення радіометричних спостережень. Даний напрямок досліджень становить інтерес, наприклад, для допоміжних завдань наземно-космічного зв'язку, стосовно до допоміжних завдань проектування перспективних мереж зв'язку. Сукупність цих обставин викликає необхідність проведення деякого додаткового і повторного ана-

лізу ситуації з метою техніко-економічної оптимізації апаратурно-методичного забезпечення методу радіометрії.

У даній роботі розглянуті:

- питання необхідності врахування мікрокліматичних особливостей місцевості при проектуванні перспективних систем радіорелейного і наземно-космічного зв'язку;
- питання розвитку апаратури радіометричного вимірювального комплексу, за рахунок використання надмалошумних бюджетних приймачів СМ ДВ і оригінальних схемних і алгоритмічних рішень;
- питання методичного забезпечення мікрохвильових радіометричних спостережень з оцінкою точності конкуруючих методів калібрування і апаратурних параметрів.

Крім того, як в інтересах вирішення існуючих проблем ДЗ, так і для вирішення комунікаційних завдань розглянуті питання вибору оптимальних робочих частот. Цей вибір проводиться в роботі з урахуванням нових тенденцій в розвитку елементної бази для високочутливих ширококутових приймачів. Процедури проектування і практичної перевірки працездатності створеного трьохчастотного радіометричного комплексу проводилися з урахуванням вимог комплексного забезпечення необхідної чутливості радіометрів і мінімізації їх вартості.

Облік наведених в роботі даних і отриманих результатів може бути корисний при проектуванні багаточастотних вимірювальних радіометричних систем, при підготовці і проведенні циклів експериментальних досліджень радіофізичних параметрів об'єктів навколишнього середовища.

Актуальність питань вивчення статистичних параметрів повного вертикального і погонного приземного ослаблення радіохвиль ММ діапазону різко зросла в світі в останні роки з огляду на розробки перспективних надшвидкісних і інформаційних мереж наземно-космічної та тропосферного зв'язку п'ятого покоління (5G) використовують частотні діапазони 10-100 ГГц. Застосування цього щодо нового для широкомасштабно використовуваних комунікаційних додатків діапазону дозволяє забез-

печити зростання обсягів і швидкості переданої інформації вище 10 Гбіт/сек при прийнятних рівнях готовності в мережах зв'язку.

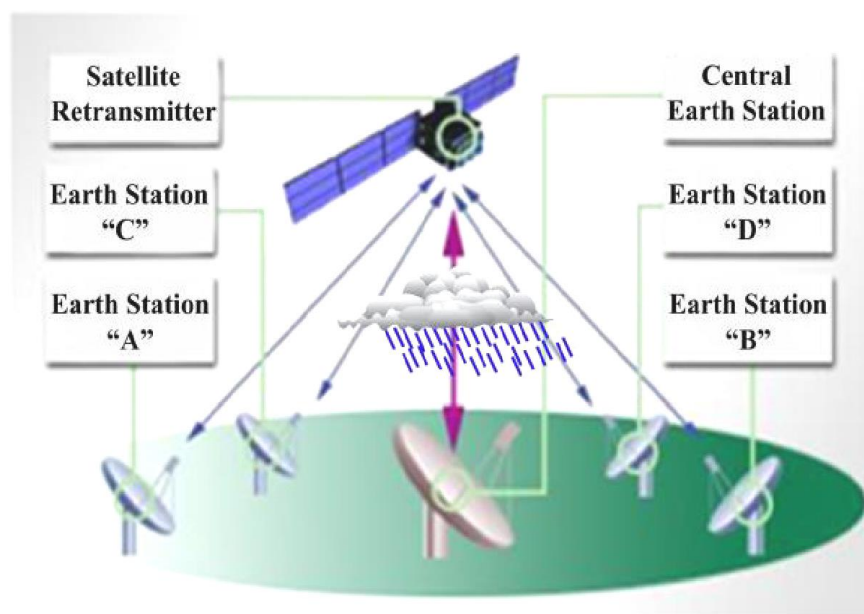


Рисунок 3.1 – Приклад організації мережі супутникового зв'язку типу «Зірка».

При цьому величина коефіцієнта готовності лінії зв'язку є ключовою характеристикою, що визначає надійність інформації, що передається. Розрахувати значення параметра готовності/неготовності лінії зв'язку можна, використовуючи рекомендації міжнародного союзу з телекомунікацій ITU [2-3], на основі наступних виразів розрахунку бюджету радіолінії на трасі [4]:

$$P_r = P_t + G_t - L_{FS} - L_{rain} - L_{atm} + G_r, \quad (3.2)$$

де P_t – потужність передавача в дБм; G_t , G_r – коефіцієнт посилення антени передавача і приймача в дБі; L_{FS} – загасання сигналу у вільному просторі; $c = 3 \cdot 10^8$ – швидкість світла, м / с.

$$L_{FS} = 20 \lg \frac{4\pi df}{c}. \quad (3.3)$$

Загасання сигналу в дощі визначається виразом:

$$L_{rain} = L_{sp_rain} \cdot r \cdot d / 1000, \quad (3.4)$$

де L_{sp_rain} – специфічний коефіцієнт загасання дБм / км [2]; d – довжина траси в м; r – поправка.

$$L_{sp_rain} = k(f) \cdot RR^{\alpha(f)} \quad (3.5)$$

де RR – інтенсивність дощу в мм / год; $k(f)$ а $\alpha(f)$ і константи, що залежать від частоти і поляризації сигналу [2].

Поправка r , яка враховує той факт, що дощ падає тільки на частину лінії зв'язку, визначається виразом [5].

$$r = (1 + d/35 \exp(-0.015RR))^{-1} \quad (3.6)$$

Загасання сигналу в атмосферних газах L_{atm} визначається з виразу

$$L_{atm} = L_{sp_atm} \cdot d/1000 \quad (3.7)$$

де L_{sp_rain} – специфічне загасання dBm / км, яке обчислюється за рекомендаціями ITU [3].

Максимальні втрати в дощі можуть бути визначені з рівняння (3.1) з використанням чутливості приймача P_{r_min} для заданого значення бітової помилки (BER) в такий спосіб [6]:

$$L_{rain_max} = P_t + G_t + G_r - P_{r_min} - L_{FS} - L_{atm} \quad (3.8)$$

Підставляючи (3.3-3.5) в (3.7) отримуємо такий вираз:

$$\frac{RR_{max}^{\alpha(f)}}{1 + d/35 \exp(-0.015RR_{max})} = \frac{1000}{k(f)d} (P_t + G_t + G_r - P_{r_min} - L_{FS} - L_{atm}) \quad (3.9)$$

З рівняння (3.9) можна визначити максимальне значення дощової норми RR_{max} , яке гарантує доступність каналу зв'язку, в залежності від частоти, відстані і потужності передавача. Однак ліва частина виразу (3.9) є дуже складним виразом RR_{max} , і тому для його вирішення потрібно використовувати обчислювальні методи. Крім того, якщо відомо статистичний розподіл інтенсивності дощів $p(RR)$ (ймовірність p , величина інтенсивності дощів для якої більше RR), можна отримати ймовірність порушення зв'язку.

Приклад такого розрахунку, проведеного для тропосферної траси в Болгарії з урахуванням статистики дощів [6], показаний на рис. 3.2. В основі таких розрахун-

ків, крім конкретизації поставлених апаратурних параметрів лінії зв'язку (чутливість приймача, яку випромінює потужність передавача, коефіцієнт посилення антени і ін.) Необхідні дані про кумулятивної функції розподілу атмосферного ослаблення для кожного розглянутого регіону. У випадках відсутності такої статистичної інформації для деяких регіонів світу, є можливість скористатися запропонованими ІТУ наближеними значеннями, характерними для умовно розділених на глобусі зон (рис. 3.3).

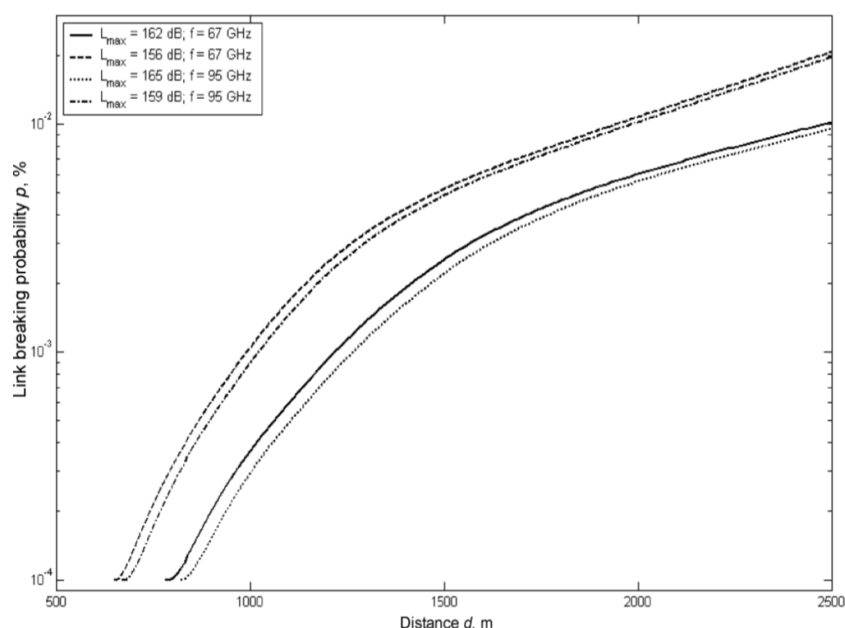


Рисунок 3.2 – Імовірність розриву зв'язку p в% в залежності від довжини d горизонтальної траси для частот 67 ГГц і 95 ГГц [6].

Однак, з огляду на важливість отримання максимально адекватних оцінок прогнозування надійності зв'язку, ІТУ рекомендує все ж заповнювати прогалини модельного обліку мікрокліматичних особливостей кожного регіону шляхом експериментального накопичення сезонної і річної статистики атмосферного ослаблення. Адже добре відомо, що зі збільшенням робочої частоти стрімко зменшується дальність зв'язку, підвищується залежність проходження сигналу, а значить і залежність просторової конфігурації та розміру мережевий стільники, від погодних та мікрокліматичних умов, характерних для конкретного регіону.

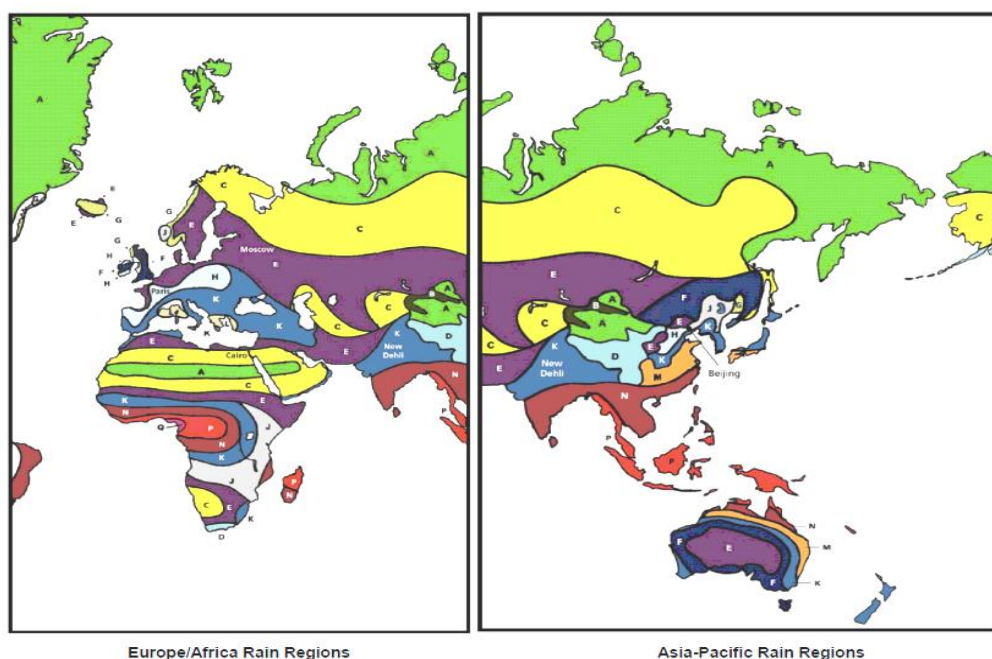


Рисунок 3.3 – Укрупненна карта кліматичних зон по ІТУ [2].

Для території України такі експериментальні дані про кумулятивних функціях вертикального і горизонтального атмосферного ослаблення в ММ ДВ відсутні, при тому, що ця інформація дуже важлива для економічної ефективності прийняття технічних рішень і для конкурентної спроможності їх практичного впровадження. Певним винятком можна вважати вельми наближені оцінки авторів [7], зроблені на основі багаторічних метеоданих отриманих з більш ніж 20 хвилинним інтервалом часу вибірки вимірювань. Незважаючи на цей суттєвий недолік, який обмежує надійність отриманих абсолютних значень кумулятивної функції (адже бажано використання інтервалу вибірки не більше 1 хв.). Краще звернути увагу на наявність багаторазової відмінності в імовірності подій з підвищеним ослабленням при порівнянні деяких регіонів України (рис. 3.4). Ця виявлена якісна закономірність лише підтверджує необхідність проведення додаткових досліджень для обліку мікрокліматичних особливостей місцевості з метою інфраструктурної та апаратурної оптимізації проєктованих перспективних наземно-космічних і приземних засобів і мереж зв'язку.

Важливою складовою при підготовці і проведенні таких досліджень є використання апаратно-методичне забезпечення.

На горизонтальних трасах накопичення таких відсутніх даних може бути проведено на основі приймальної і передавальної апаратури, встановленої на приземних трасах, в сукупності з допоміжною метеорологічною апаратурою з 1 хв. інтервалом вимірювань.

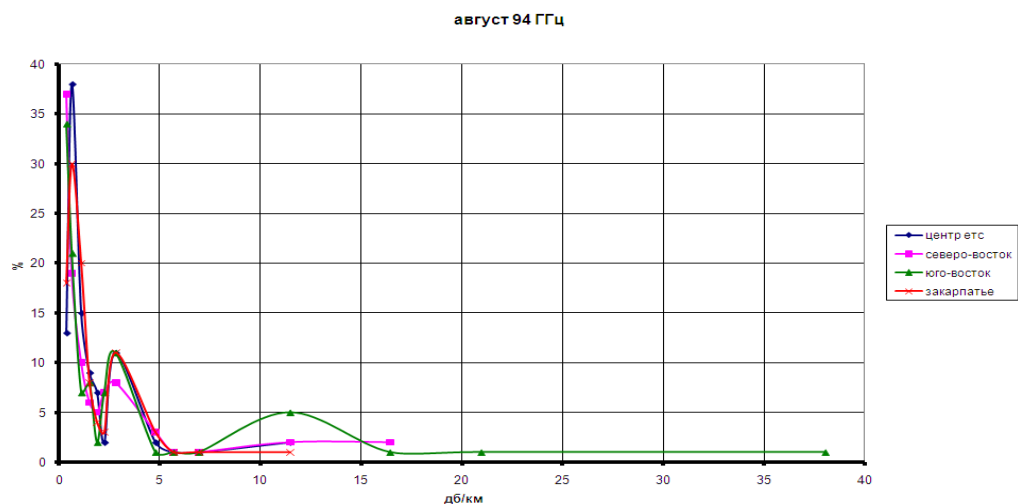


Рисунок 3.4 – Гістограма ймовірності розподілу погонного приземного атмосферного ослаблення в діапазоні 94 ГГц (серпень) для чотирьох регіонів України [7].

На вертикальних трасах найбільш зручним для аналогічних цілей є використання апаратури і методів радіометрії, використання яких більш характерно для задач ДЗ навколишнього середовища. Причому, обидва ці напрями досліджень можна проводити з використанням одного і того ж обладнання. При цьому, бажано, щоб це радіометричне обладнання дозволяло вимірювати і аналізувати значення повного вертикального ослаблення радіохвиль в декількох частотних діапазонах одночасно.

3.2 Вибір робочих частот і схема побудови вимірювального комплексу

3.2.1. Обґрунтування вибору робочих частот

Процедура визначення фізичних параметрів атмосфери, як правило, складається з наступних етапів отримання і обробки даних:

- а) вимір антеною температури радіометра, яку можна уявити як:

$$T_a = T_{eff}(1 - e_{\tau sec \theta})(1 - \beta)\mu + T_{bgr}\beta\mu + 2.7e^{-\tau sec \theta}(1 - \beta)\mu + T_o(1 - \mu), \quad (3.10)$$

де T_{bgr} – усереднена величина радіояркостной температури фону прийнятої поза основної пелюстки діаграми спрямованості (ДС) антени радіометра; β – коефіцієнт розсіювання поза основної пелюстки ДС антени; μ – к.к.д. антени.

б) визначення радіояркостной температури атмосфери T_b в напрямку головної пелюстки ДС антени по вимірним значенням T_a з урахуванням виразів (1) і (3);

в) визначення значень τ (Непер) і повного вертикального ослаблення (дБ) на основі даних про T_b з метою побудови кумулятивних функцій розподілу цих параметрів для телекомунікаційних додатків. При вирішенні завдань ДЗ дані про значення τ на різних частотах необхідні для вирішення системи рівнянь:

$$\alpha_{total}^{\lambda_i} = \alpha_{oxygen}^{\lambda_i} + \Phi_{\lambda_i} Q + k_{\lambda_i}(T_0) W, \quad (3.11)$$

де i – номер частотного діапазону, – відновлюване значення Вологозапаси атмосфери (пароподібна волога); – відновлюване значення водозапаса атмосфери (крапельна волога); i – коефіцієнти питомої поглинання в парообразной і жідкокапельной вологи атмосфери відповідно.

Зрозуміло, що рішення таких систем рівнянь з двома змінними Q і W є більш прийнятним для випадків суттєвої різниці використовуваних частот.

Для визначення найбільш кращою пари частот для таких додатків ДЗ нами були розраховані коефіцієнти лінійного поглинання в хмарах в залежності від їх температури для частот 4, 12, 20, 40 і 94 ГГц (табл. 3.1). Для розрахунку цих даних нами використовувалася відома модель MPM (Atmospheric Millimeter Waves Propagation Model) [8]. Доречно зауважити, що кожна з розглянутих тут частот корисна не тільки для вирішення завдань ДЗ, але і для розробки перспективних засобів зв'язку, наприклад, у форматі 5G.

Частоти 40 і 94 ГГц вважаються традиційними в задачах ДЗ атмосфери. Включення в розгляд частот 4, 12, 20 ГГц пов'язано з можливістю побудови в цих діапазонах високочутливих і в той же час високобюджетних радіометрів, на основі широко використовуваних сучасних промислових приймачів супутникових телевізійних сигналів з показником шуму менше 1 дБ. Наші розрахунки показали, що викори-

стання таких приймачів при побудові радіометра дозволяє забезпечити досягнення флуктуаційної чутливості в кілька сотих, а можливо і тисячних часток К.

Аналіз даних наведених в табл. 3.1 показує, що найбільш чутливим до зміни водозапаса хмарного покриття є радіометри діапазону 94 ГГц.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнт питомої ослаблення в хмарних краплях (дБ \ кг / м²) в залежності від їх температури для частот 4, 12, 20, 40 і 94 ГГц

Частота	Температура, °C						Зростання T_y атмосфери при зміні змісту крапельної вологи на 0.1 кг/м ² кг/м ² (T° капель - 0°C)
	-30	-20	-10	0	10	20	
4 GHz	0.039	0.031	0.021	0.015	0.011	0.009	0,1 К
12 GHz	0.327	0.269	0.188	0.133	0.098	0.077	0,9 К
19 GHz	0.733	0.625	0.454	0.326	0.244	0.191	2,1 К
41 GHz	2.111	2.029	1.732	1.363	1.067	0.857	9 К
94 GHz	4.243	4.457	4.824	4.73	4.284	3.757	31 К

При цьому, реакція радіометра діапазону 4 ГГц на зміни водозапаса хмар буде більш ніж на два порядки менший ніж в діапазоні 94 ГГц. Ця обставина змушує виключити можливість застосування З ДВ з подальшого розгляду в якості другого додаткового каналу. Реакція радіометра діапазону 12 ГГц приблизно в 30 разів відрізняється від радіометрів, що працюють в діапазоні 94 ГГц. Однак, на наш погляд, його використання може бути виправдане тим, що в цьому діапазоні хвиль є можливість реалізувати приблизно в 30 разів більшу чутливість, а також тим, що такий пристрій вимагає найменших фінансових витрат для його реалізації. Радіометри, побудовані в інших розглянутих нами ДХ, будуть мати проміжні показники по розглянутих параметрах вартості, чутливості і реакції на зміну атмосферної крапельної вологи.

Звертає на себе також факт, що температурна залежність коефіцієнтів погонного поглинання в краплях досить істотна для всіх розглянутих частот, за винятком 94 ГГц. Ця обставина вказує на необхідність досить точного знання ефективної температури хмарного покриття при вирішенні задач відновлення його водозапаса.

У табл. 3.2 приведені отримані в роботі розрахункові значення (в разях) співвідношень між вираженими в дБ / км величинами погонного поглинання хмар для різних температур крапель і для різних пар частот.

Видно, що якщо для одних пар частот температурна залежність співвідношень відсутня, або виражена слабо, то для пар частот 94 ГГц / 19 ГГц і особливо 94 ГГц / 12 ГГц, така залежність яскраво виражена. Цю обставину можна використовувати для моніторингу ефективної температури хмар при відновленні параметрів водозапаса за даними двочастотних радіометричних вимірювань.

З урахуванням проведеного розгляду, на даному етапі, нами була обрана пара частот 12 ГГц і 94 ГГц для реалізації вимірювальної системи, призначеної для дистанційного моніторингу атмосферної вологості.

Крім ясної чи хмарної атмосфери, в практиці дистанційного зондування, а також в сучасних і перспективних системах зв'язку, важливу і вимагає обліку роль відіграють дощі [6, 9]. Результати розрахунків частотної залежності погонного поглинання в дощах різної інтенсивності, а також залежно γ від інтенсивності для виділених вище п'яти частот, були проведені нами за допомогою моделі Ліба [8] (табл. 3.3).

Отримані дані також вказують на безперспективність використання ДХ (4 ГГц) для дистанційного моніторингу параметрів дощів методом радіометрії через дуже малого впливу дощових крапель на величину погонного поглинання атмосферою в цьому ДХ.

Таблиця 3.2 – Значення співвідношень (в разях) між величинами питомої поглинання в хмарах (ДБ/км) для різних пар частот в залежності від температури крапель

Частота	Температура, °C						
	-30	-20	-10	0	10	20	
94/12 GHz	13	16,56	25,56	35,56	43,7	48,8	max
94/19 GHz	5,8	7,2	10,6	14,5.	17,6	19,7	
94/41 GHz	2,0	2,2	2,8	3,5	4,0	4,4	
41/12 GHz	6,4	7,5	9,2	10,25	10,9	11,1	
12/4 GHz	8,4	8,7	9,0	8,9	8,9	8,6	
19/12 GHz	2,25	2,3	2,4	2,45	2,49	2,48	min

У той же час видно, що кратність збільшення атмосферного загасання, викликаного зростанням інтенсивності дощу в СМ ДВ в 2-3 рази вище, ніж спостережуване зростання цього параметра в ММ ДВ.

При цьому абсолютні значення погонного поглинання в діапазоні 20 ГГц можна вважати цілком прийнятними для їх вимірювання радіометричним методом і для подальшого відновлення висоти дощового шару за даними трьох-частотних вимірювань. У найближчій перспективі нами передбачається розвиток описаної нижче вимірювальної системи шляхом введення радіометричного каналу діапазону 20 ГГц на додаток до вже створених радіометричних каналів. Це рішення повинно розширити можливості атмосферного моніторингу, забезпечивши відновлення такого додаткового параметра, як висота дощового шару.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнт питомої ослаблення в дощі (дБ\кг/м²) в залежності від їх температури для частот 4, 12, 20, 40 і 94 ГГц

Частота	Інтенсивність дощу (мм/час)									
	1	5	10	15	Співвідношення γ (для 1 и 15мм\ч)	20	40	80	120	
94 GHz	0,98	3,35	6,0	7,77	~8	9,7	16,4	28,0	38,0	дБ/км
40 GHz	0,32	1,5	2,9	4,3	~14	5,7	11,1	21,7	32,0	дБ/км
20 GHz	0,06	0,36	0,77	1,2	~20	1,7	3,60	7,90	12,4	дБ/км
12 GHz	0,017	0,112	0,25	0,4	~25	0,56	1,25	2,80	4,48	дБ/км
4 GHz	0.0012	0,0066	0,014	0,021	~18	0,029	0,06	0,125	0,20	дБ/км

3.2.2 Схема побудови вимірювального комплексу

Структурна схема радіометричного двухчастотного комплексу ХАІ і схема вимірювань показані на рис. 3.5.

Схема містить наступні блоки: А – позначає відповідну антену (); – антенний промінь; LNA – підсилювач з низьким рівнем шуму; LPA – фільтр нижніх частот; PIN DM – це рін-діодний модулятор; FC – феритовий циркулятор; М – змішувач; BPF – смуговий прохідний фільтр; GO – генератор Ганна; CG – керуючий генератор; IFA – підсилювач проміжної частоти; SqD – квадратний детектор; SD – синхронний детектор; DCA – підсилювач постійного струму; ADC – аналого-цифровий перетворювач.

Видно, що обидва радіометра реалізовані за різними схемами. Радіометр, що працює на антену – це бездіплексний [10] радіометр модуляционного типу. Центральна частота настройки приймач 94 ГГц и ширина Смуги частот по входу 600 МГц. Робота цього радіометра, що Забезпечує флуктуаційну чутливість радіотеплового сигналу 0.25 До докладно викладу в [11].

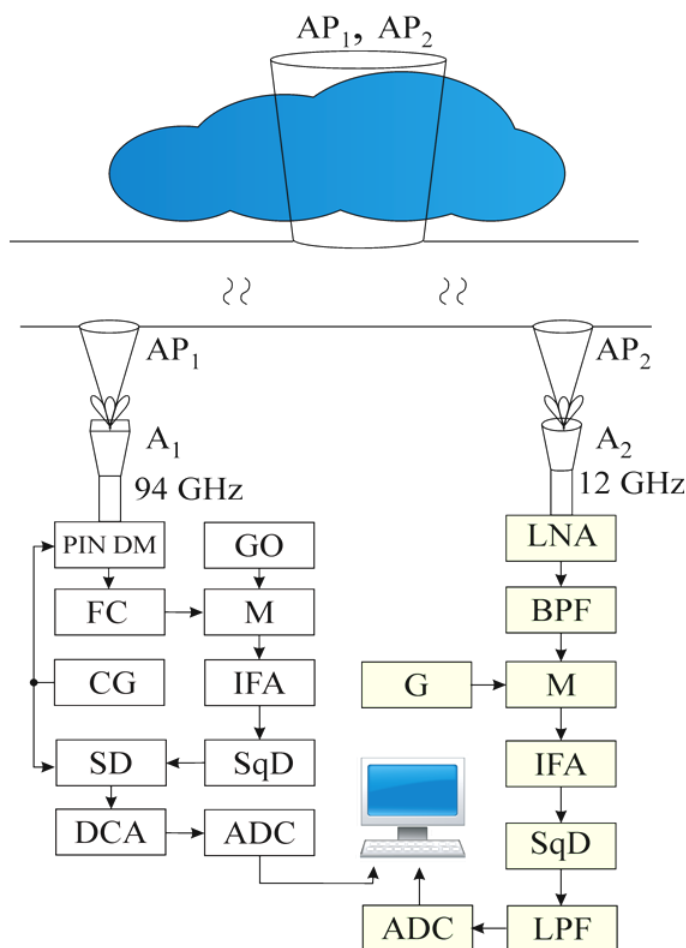


Рисунок 3.5 – Блок-схема радіометричного комплексу та схеми вимірювання.

Другий канал радіометра реалізований за схемою радіометра повної потужності з одноразовим перетворенням частоти. Цей радіометр повної потужності 3 см ДХ побудований на основі Типової плати ТВ конвертора супергетеродинного типу Х-діапазону.

Прийом сигналу шумового сигналу здійснюється в односмуговому режимі в діапазоні 11.7-12.75 ГГц. На вході радіометричного приймач використовується польовий транзистор типу NE4210S01-T1 (NEC) з коефіцієнтом шуму не більше 0.75дБ. З виходом приймач шумового сигналу надходить на квадратичний детектор, ланцюг інтегратора, УПТ и АЦП. Виміряна флуктуаційна чутливість радіометра працював в режимі прийому повної потужності шумового сигналу склалось 0.03 К.

Фотографія радіометричного комплексу ХАІ показана на рис. 3.6. 12 ГГц антена показана зліва, а праворуч показана антена 94 ГГц. Всі блоки комплексу розташовані в коробці під антенами.

Вимірювальна система ХНУРЕ 8 мм ДХ з флуктуаційної чутливістю 0.2 До показана на рис 3.7. Схема побудова и склад цього радіометра були описані Ранее в [12].

Оціфровані сигнали з виходів АЦП передаються на персональний комп'ютер для подалі розрахунків, ОБРОБКИ и представлення Даних.



Рисунок 3.6 – Фото радіометричного комплексу 3 см і 3 мм ХАІ



Рисунок 3.7 – Фото радіометричного комплексу 8 мм ХНУРЕ

Спільне використання цього трехчастотного радіометричного комплексу передбачається як для задач ДЗ атмосферної вологи і параметрів хмар, так і для згаданих вище досліджень мінливості значень повного вертикального ослаблення в задачах наземно-космічного зв'язку [13], зокрема ліній зв'язку 5G.

Для реалізації комунікаційної складової цієї програми атмосферних досліджень в інтересах побудови перспективних бездротових каналів зв'язку нами створена експериментальна приземному лінія зв'язку на основі використання точок доступу MikroTik Wireless Wire (RBwAPG-60ad kit) в діапазоні 60 ГГц (рис. 3.8).

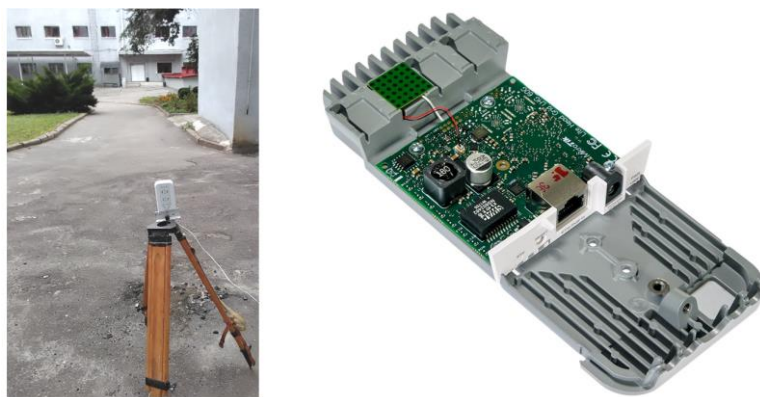


Рисунок 3.8 – Фото експериментальної лінії зв'язку (а) діапазону 60 ГГц на основі радіомодемів MikroTik Wireless Wire (б)

У цій системі зв'язку використовується фазированная антенна решітка для формування вузької діаграми направленості і збільшення енергетичного потенціалу лінії зв'язку.

3.3 Результати експериментальних досліджень

За допомогою описаного вище радіометричного комплексу нами були проведені різні попередні експериментальні дослідження.

Кожен з радіометричних каналів був незалежно випробуваний для аналізу атмосферних утворень (хмар). На рис. 3.9 фрагменти зміни яскравості неба в часі реєструються на довжині хвилі 3 см (квітень 2017 року) і 3 мм (травень 2017 року) при проходженні двох весняних атмосферних фронтів над пунктом вимірювання протягом 25 і 16 годин, відповідно.

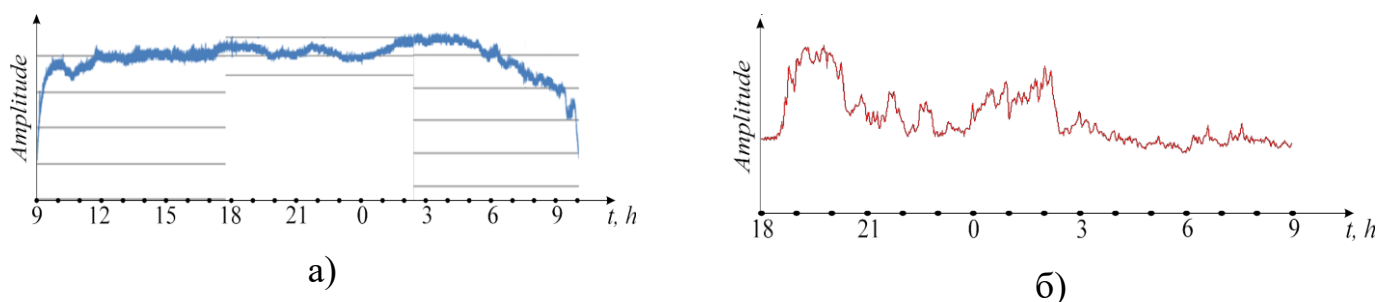


Рисунок 3.9 – Фрагменти записи зміни радіояскравісної температури неба в 3 см ДВ (А - квітень 2017) і 3 мм ДХ (б - травень) при проходженні 2-х весняних атмосферних фронтів над вимірювальним пунктом протягом 25 і 16 годин відповідно.

Розроблений прототип вимірювального комплексу успішно пройшов лабораторні та натурні випробування. На рис. 3.10 показаний фрагмент запису зміни радіовипромінювання неба в 3 мм і 8 мм СБ при проходженні фронтальної зони хмарності. Наведені на цьому малюнку дані, дозволяють відновити динаміку зміни повного вертикального ослаблення в атмосфері, значень ефективної температури конденсованої вологи в небі, значень змісту крапельної води і парообразної вологи в хмарах.

Результат відновлення ефективної температури хмарного шару за даними змін радіовипромінювання неба, зображених на рис. 3.10, показаний на рис. 3.11. Використана тут процедура відновлення ефективної температури хмарного шару була заснована на добре відомих формулах подвійного Дебая [8].

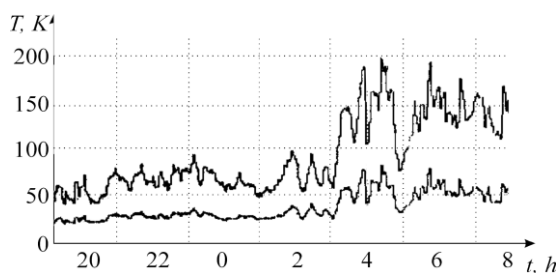


Рисунок 3.10 – Фрагмент запису зміни радіовипромінювання неба на частоті 94 ГГц (Верхня крива) і 40 ГГц при проходженні через фронтальну зону хмарності з 19 до 8 години ранку.



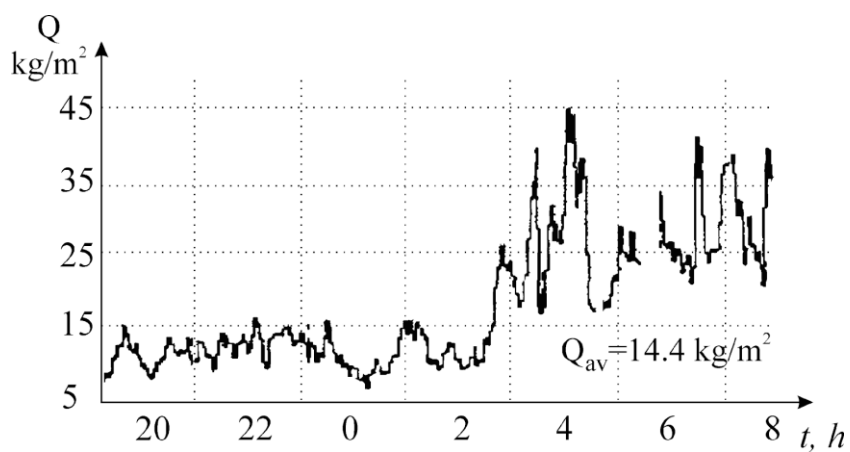
Рисунок 3.11 – Результат відновлення ефективної температури хмарного шару

Отримані значення змісту пара в атмосфері (Q) і рідини (W) в хмарах представлені на рис. 3.12 (а) і 12 (б).

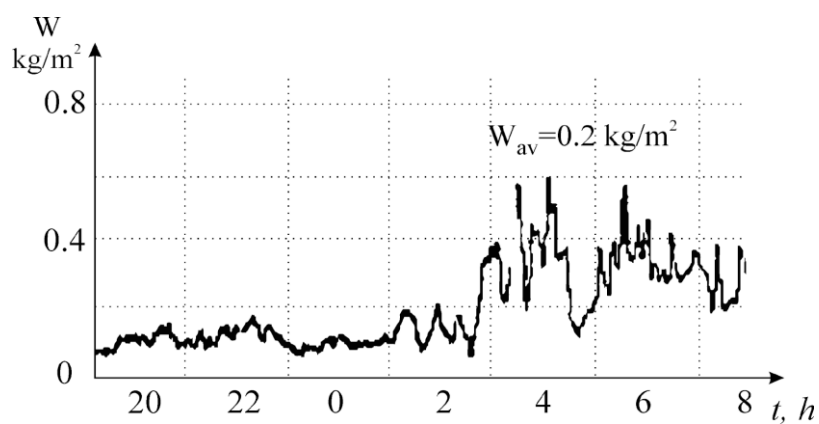
Аналіз первинних даних двохвильовому радіометричних вимірювань в 3 мм і 8 мм ДХ дозволяє також визначати зони хмар, які містять кристалеву вологу, а поляризаційний режим вимірювань дає можливість досліджувати морфологічну структуру кристалів замороженої вологи.

Можливості виявлення людського тіла на тлі неба показані на рис. 3.13. На малюнках показана реакція вихідних сигналів радіометрів на перетин їх діаграм, які спрямовані в бік вікна під кутом 20 градусів над горизонтом. Перший рівень сигналу (див. Стрілки 1 на рис. 3.13) було отримано при відкритті обох віконних рамок, другий рівень (див. Стрілки 2 на рис. 3.13) – коли одна віконна рама була закрита, третій (див. Стрілки 3 на рис. 3.13) – коли обидві віконні рами були закриті. Поодинокі сплески на графіках відповідають моментам перетину людиною діаграм спрямованості радіометричного комплексу.

Поодинокі сплески на графіках відповідають моментам перетину людиною діаграм радіометричних антен.

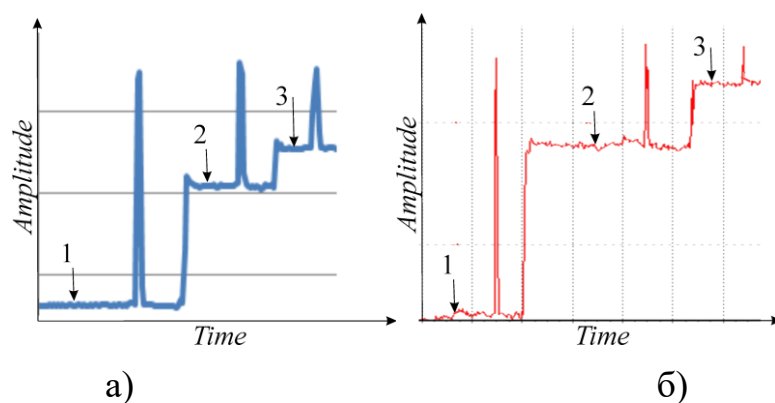


(a)



(б)

Рисунок 3.12 – Відновлені значення волого (а) і водо (б) змісту хмар.

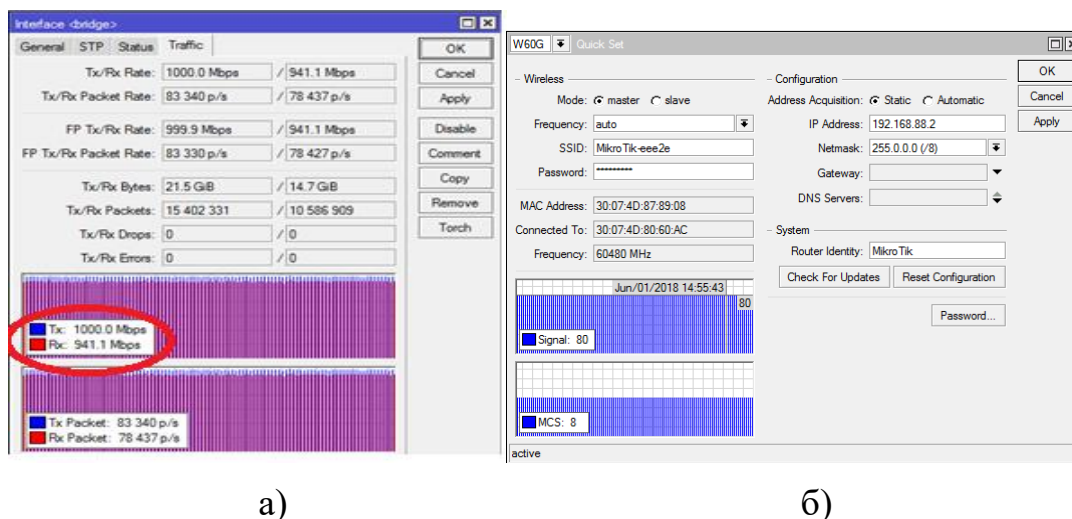


a)

б)

Рисунок 3.13 – Виявлення людського тіла за допомогою 3-х сантиметрового радіометра (а) і 3 мм радіометра (б) на трьох різних фонах.

Оцінка пропускної здатності експериментального каналу зв'язку 60 ГГц на обладнанні MikroTik в режимі бездротового мосту з використанням програмного трафік-генератора (рис. 3.14) показало, що максимальна швидкість передачі інформації 1 Гбіт / сек досягається на відстані більше 120 м в умовах міської забудови. Це підтверджує можливість реалізувати сценарії розгортання мереж 5G в діапазоні 60 ГГц на основі малих сот (Small Cell).



а)

б)

Рисунок 3.14 – Інтерфейс програми трафік-генератора, що показує швидкість передачі інформації (а), а також рівень сигналу і тип модуляції (б)

3.4 Питання методичного забезпечення спостережень

У радіометрії інтенсивність прийнятого від досліджуваної середовища радіо-теплого випромінювання прийнято виражати в значеннях радіояркостной температури (T_b) подається в градусах Кельвіна (К). Вирішення цього завдання проводиться шляхом калібрування вимірювальної апаратури. Процедура радіометричного моніторингу атмосфери передбачає, крім забезпечення калібрування вимірювальної апаратури, подальший перехід від вимірних значень антеною температури радіометрів (T_a) до радіояркостной температурі об'єкта випромінювання [15]. Потім ці дані використовуються для відновлення значень атмосферного поглинання, а, в ряді завдань дистанційного зондування, для подальшого відновлення фізичних параметрів спостережуваних об'єктів.

До теперішнього часу розроблені різні способи вирішення цих завдань. Вибір конкретного методу калібрування радіометричної апаратури і методів відновлення параметрів атмосфери проводиться, як правило, на основі комплексного і компромісного розгляду вимог до точності визначених параметрів, до простоти і зручності процедур вимірювань. Остаточне рішення цього питання обумовлено також технічними можливостями і наявністю допоміжних пристроїв і оснащення в умовах лабораторних або польових (експедиційних) вимірювань.

3.4.1. Оцінки точності процедур калібрування радіометра

Калібрування радіометричної апаратури проводиться з метою перетворення реєстрованих на виході радіометра значень напруги (струму) в значення антеною температури.

Переважає більшість використовуваних на практиці процедур калібрування засновані на методі двох узгоджених навантажень антени, кожна з яких має відому і істотно відмінну від іншої T_b . При цьому одна з узгоджених навантажень антени радіометра має контрольовану температуру навколишнього середовища. Різниця ж методів калібрування зазвичай пов'язане з методом забезпечення контрольованої T_b сигналу від другого навантаження або об'єкта власного радіотеплового випромінювання в використовуваному ДХ. Тоді величина антеною температури досліджуваного об'єкта визначається експериментально як:

$$T_a = T_0 \frac{T_{b1} - T_{b2}}{U_1 - U_2} (U_1 - U_x) \quad T_a = T_0 \frac{T_{b1} - T_{b2}}{U_1 - U_2} (U_1 - U_x), \quad (3.12)$$

де α – перший співмножник являє собою калібрований коефіцієнт (К \ Вольт), T_0 – термодинамічна температура першої навантаження (К); U_1, U_2, U_3 – відповідно рівень вихідного сигналу радіометра прийнятого від 1-й, 2-й калібрувальних навантажень і від спостережуваного (досліджуваного) об'єкта (В).

В роботі проведено аналіз впливу точності калібрування на визначення T_b неба для методів калібрування проводяться за допомогою: а) узгодженої навантаження опромінювача, що знаходиться при кімнатній температурі (близько 300К) і при температурі кипіння рідкого азоту (близько 78К); б) по радіовипромінюванню неохолоджуваної навантаження опромінювача і радіовипромінюванню атмосфери (з вико-

ристанням величини T_b атмосфери, розрахованої або по Метеодані, або виміряної за допомогою еталонного рупора); в) по 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. У цьому випадку зазначена сума сигналів буде знаходитися в хорошому відношенні до відомої величиною термодинамічної температури навантаження. Це твердження пов'язане з тим, що радіотеплове випромінювання неба в напрямку 60° від зеніту з високим ступенем точності становить величину рівну $2T_b$ зеніту.

Можна також показати, що зв'язок визначається експериментально за допомогою виразу (5) величини T_a з шуканої величиною T_b спадного випромінювання атмосфери можна записати як:

$$T_a = T_b(1 - \beta)\mu + T_{bgr}\beta\mu + 2.7e^{-\tau\sec\theta}(1 - \beta)\mu + T_0(1 - \mu) \quad , \quad (3.13)$$

$$\text{де } T_b = T_{\text{eff}}(1 - e^{\tau\sec\theta}) \quad .$$

Визначення T_b атмосфери за результатами вимірювання T_a , як правило, проводиться шляхом використання обох виразів (3) і (6).

З аналізу цих виразів випливає, що крім каліброваного коефіцієнта α , найгірше вплив на точність визначення T_b буде надавати точність визначення параметра, що характеризує розсіюють властивості антени $p = (1 - \beta)\mu$, а також точність оцінки усереднених значень фонового випромінювання (T_{bgr}) прийнятого з напрямків поза основної пелюстки ДС антени. З огляду на простоти забезпечення високої точності оцінки або контролю інших параметрів, прямо або побічно входять в ці вирази (кут візування, термодинамічна температура навколишнього середовища $T_{e\text{at}}$ і ін.) Ми не будемо їх розглядати в подальшому обговоренні.

Найбільш ефективно необхідність визначення величини T_{bgr} можна виключити з розгляду за допомогою методу ШМ. В цьому випадку T_a атмосфери ($T_a \text{ атм}$) і T_a ШМ ($T_a \text{ шм}$) - вимірюється за допомогою обраного методу калібрування, а потім обчислюється T_b з системи двох рівнянь, - вирази (3) і аналогічного йому, записаного для випадку, коли диск ІЛ перекриває головний промінь ДН антени радіометра.

Тут, на першому кроці, τ може бути оцінений дуже приблизно, наприклад, розраховане по Метеодані, зважаючи на порядок менші за розміром цього доданка. Потім більш точне значення τ можна відновити, використовуючи значення T_b визначаються з відомого вислову (6). При такому підході найбільш істотний вплив на точність вимірювань радіояркості об'єкта досліджень нададуть обраний метод калібрування радіометричної системи і реалізація її процедури, а також спосіб визначення параметрів розсіювання антени – p .

Варто зазначити, що відновлення значень повного вертикального поглинання в атмосфері можна проводити також різними методами. Наприклад, радіометричним методом угломестной розрізів [1] або методом просвічування атмосфери випромінюваними сигналами супутника або потужного джерела космічного випромінювання. Недоліками цих підходів є те, що обидва цих методу вимагають використання складного додаткового обладнання у вигляді антенно-поворотного пристрою, виконання вимоги до вузької спрямованості антен і наявності спеціального програмного забезпечення, наявністю залежності від погодних умов або часу доби. Тому проведення такого роду експериментальних досліджень τ радіометричним способом, який спирається на зв'язок вимірюваної T_a з обумовленою T_b на підставі виразу (3) слід вважати більш практичним і зручним в його реалізації.

Розгляд впливу перерахованих вище методів калібрування радіометрів і декількох способів визначення розсіюють властивостей антени на точність вимірювання T_b атмосфери, а також розрахунок точності визначення T_b був нами проведено для всіх конкуруючих методів за допомогою єдиного, добре відомого підходу, який заснований на використанні формул «перенесення помилок» [1, 16].

Для обчислення похибок визначення значень p , T_a , T_b , τ за допомогою перерахованих методів нами за допомогою формул перенесення помилок були записані відповідні вирази. Наприклад, для комбінації методів, коли калібрування проводиться на основі охолоджувальної до азотних температур навантаження, а параметри розсіювання АС визначаються методом ШМ, дисперсія похибки визначення T_b атм може бути описана в Відповідно до цієї формули у вигляді:

$$\sigma_{T_{\text{bм}}}^2 = \left(\frac{\partial T_{\text{bм}}}{\partial \alpha} \right)^2 \sigma_{\alpha}^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{bм}}}{\partial \Delta n} \right)^2 \sigma_{\Delta n}^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{bм}}}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_{\beta}^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{bм}}}{\partial T_{\text{at}}} \right)^2 \sigma_{T_{\text{at}}}^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{bм}}}{\partial \tau} \right)^2 \sigma_{\tau}^2, \quad (3.14)$$

де $\sigma_{T_{b atm}}$ – дисперсії похибок вимірювання або оценьки відповідних параметрів.

Обчисливши похідні і перейшовши до відносним середньоквадратическим погрешностей, можна отримати вираз для розрахунку похибки визначення T_b :

$$\delta T_{b atm} = \sigma_{T_{b atm}}^2 / T_{b atm}^2, \quad (3.15)$$

Для вимірювання параметрів розсіювання рупорної антени радіометра була розроблена спеціальна методика, яка заснована на використанні широко відомого пристрою – штучної місяця (ШМ), в поєднанні із застосуванням спеціальної порожнистої пенопластової бленди з радіопоглинаючим матеріалом, що поміщається в рідкий азот (рис. 3.15). Ця методика, що дозволяє виміряти радіометричним методом значення к.к.д. (Н) і розсіювання антени в НЕ ізоотропну (β_{ni}), ізоотропну (β_i) частини ДН, які розташовані поза головного променя ДН антени (β) детально описана в [17].

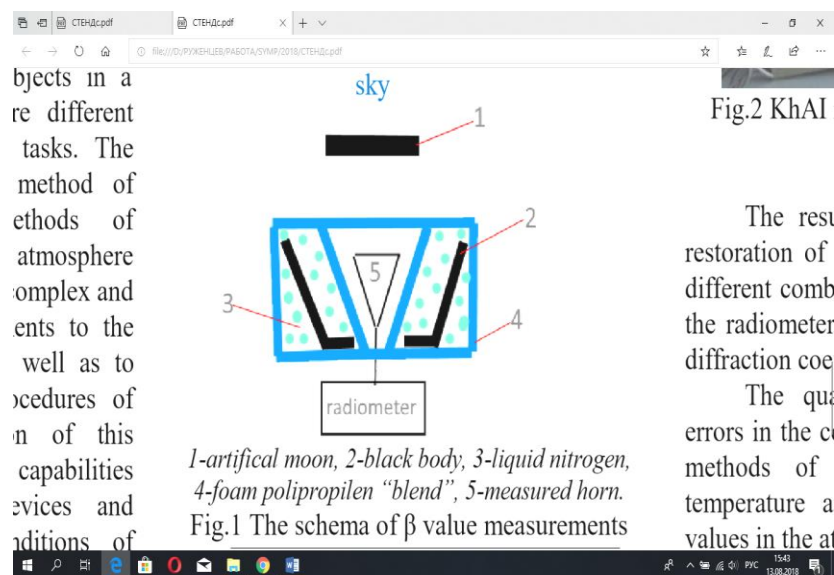


Рисунок 3.15 – Схема вимірювання параметрів розсіювання рупорної антени:

- 1 – ШМ, 2 – бленда з аналога АЧТ, 3 – рідкий азот, 4 – пінопласт ємність, 5 – досліджуваний рупор.

На підставі результатів дослідження параметрів спрямованості різних найбільш поширених типів рупорних антен [18] за допомогою даного методу най-

менша величина параметра розсіювання була відзначена у рупорів з зламами кута розкриву. Цей тип рупора, ДН якого формується шляхом корекції розподілу амплітуди і фази поля в розкритті рупора за рахунок зміни кута розкриву рупора. За допомогою такого рупора і з використанням методу двох навантажень також були проведені прецизійні вимірювання радіояскравісної температури зенітної області атмосфери.

Після чого з залученням відомого методу радіовипромінювання лісу [19] були проведені вимірювання значень β для того щоб, попередньо від'юстувати двох примірників вузьконаправлених антен Кассегрена. Отримані в діапазоні 90 ГГц значення β цих антен з 2м апертурою склали 0.24 і 0.26, в той час, як значення параметра β різних типів досліджених нами рупорних антен [18] розташовувалися в межах 0.03-0.06.

Доречно зауважити, що з технологічної та бюджетної точок зору рупор із змінним кутом розкриву є вельми перспективним для його використання аж до частот 700 ГГц [19-20]. Однак, для ММ, субмм ДВ (аж до ТГц частот) на сьогоднішній день найбільш перспективним є використання малоапертурних антен, виконаних на основі відкритого кінця пінно-діелектричної лінії передач [21-23]. За сукупністю своїх діаграм-утворюючих властивостей (УБЛ, рівню кроссполаризаційну випромінювання і рівню розсіювання поза основної пелюстки ДН), а також за своєю бюджетності і технологічності цей тип малоапертурних антен [24] перевершує досліджені нами в діапазоні 100 ГГц аналоги [17].

Поряд з описаним вище способом, що використовують охладжаемую до азотних температур пенопластовую бленду з радіопоглощающую матеріалом, для оцінок впливу на точність вимірювання T_b атмосфери величини p були також розглянуті такі методи, як:

- а) метод «штучної місяця» [18];
- б) «метод радіовипромінювання лісу» [18];
- в) метод радіовипромінювання центральній частині місячного диска в період молодика (який можна застосовувати для гостронаправлених дзеркальних антен).

Аналіз отриманих даних (табл. 3.4) продемонстрував, що максимальну точність визначення T_b атмосфери (близько 3%) можна отримати, калібруючи радіометр за допомогою охолоджувальної рідким азотом узгодженої навантаження опромінювача, а також вимірюючи розсіювання антени шляхом її розташування в радіопоглощаючій бленді і використовуючи метод «штучної місяця», за допомогою формули:

$$(1 - \beta) \mu = T_{aam} - T_{az} \setminus T_{oam} - T_{bz}, \quad (3.16)$$

де: T_{aam} – антенна температура ШМ перекриває основний пелюстка ДН антени; T_{az} – антенна температура зеніту; T_{oam} – термодинамічна температура радіопоглощаючих матеріалів бленди і ШМ; T_{bz} – значення яскравості температури зеніту.

Решта комбінації розглянутих методів забезпечували більш низькі значення точності. Для інших розглянутих методів калібрування радіометра ця обставина пов'язано з неточністю оцінок радіояркості джерел космічного випромінювання (для Місяця в діапазоні 100 ГГц, – близько 10% і наявність фактора впливу місячної фази), а також це пов'язано з обмеженою точністю визначення радіояркості атмосфери по Метеодані (5 – 10% для випадків безхмарним атмосфери).

Таблиця 3.4 – Оцінка точності визначення T_b неба для різних методів калібрування радіометра і методів вимірювання параметра розсіювання антеною системи.

Методи вимірювання параметра β	Методи калібровки	
	Метод двох навантаження (300K, 78K)	Метод розрахунку радіояркості неба
Метод випромінювання Місяця		10-17%
Метод «штучного місяця»	3%	6%
Метод «випромінювання лісу»		9%

Крім того, точність методів калібрування і методів вимірювання параметрів розсіювання антен, які використовують просторову (угломестной) переорієнтацію

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

Однак, у випадках, коли не потрібно максимально можлива точність визначення інтенсивності радіотеплового випромінювання атмосфери або джерела космічного випромінювання, має сенс використовувати більш прості і зручні в реалізації методи вимірювань. Наприклад, проводити калібрування приймачів по розрахунковому (на підставі метеоданих) випромінювання зенітної області неба (величина δT_b атм близько 5%). На практиці в програмах спостереження континуальної випромінювання атмосфери нами використовувалися різні поєднання цих методів.

Для найбільш точної з розглянутих нами вище комбінацій, що полягає у використанні методу ШМ, а також рідкого азоту для охолодження аналогів АЧТ для калібрування радіометра і визначення значення p його антени похибки вимірювання склали для $\beta - 9\%$, $\alpha - 1\%$, $T_b - 3\%$.

В данному розділі представлено три основних методи розрахунку втрат для частоти 60 ГГц. Показані результати експериментальних вимірів і приладів якими ми користувалися для збирання інформації.

ВИСНОВКИ

В данній дипломній роботі представлена радіометрична система (60 ГГц) для дослідження параметрів повного вертикального ослаблення атмосфери, а також її вологозапаси і водозапаса.

Відпрацьовано (на основі серійного телевізійного конвертора) технічно ефективний і економічний підхід для створення високочутливих неохолоджуваних радіометрів діапазонів, розташованих районі частоти 60ГГц, які можуть знайти широке застосування в задачах метеорології, допоміжних комунікаційних завданнях, а також в технологічних і охоронних додатках.

Описано методики радіометричних вимірювань радіояркості атмосфери і ослаблення в ній радіохвиль з якісним аналізом джерел помилок і кількісною оцінкою точності різних комбінацій калібрувальних методів радіометра і методів вимірювання коефіцієнта розсіювання антени.

Показано, що ефективне використання діапазону 60 ГГц при розгортання мереж 5G на основі малих сот вимагає обліку мікрокліматичних факторів.

Розроблене апаратурно-методичне забезпечення для дослідження радіофізичних параметрів атмосфери становить інтерес для задач метеорології, кліматології і штучного впливу на хмари, а також для визначення параметрів надійності ліній супутникового зв'язку в рамках перспективного 5G формату.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко, Г. Г. Щукин, Л. П. Бобылев, С. Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 283 с.
2. *Rec. ITU-R P.838-3*, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.
3. *Rec. ITU-R P.838* Definition of availability for radiocommunication circuits in the mobile-satellite service
4. *J. Seybold*, Introduction to RF propagation, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005
5. *R. L. Freeman*, Radio System Design for Telecommunications, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
6. *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.
7. Руженцев Н.В. Вертикальное атмосферное ослабление радиоволн миллиметрового диапазона //Издательство *LAMBERT Academic Publishing* (Германия), 2015, 128 стр.
8. 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.
9. Martin Grabner, Vaclav Kvicera, Ondrej Fiser “Rain attenuation measurements and prediction on parallel 860-nm free space optical and 58-GHz millimeter-wave path,” Opt. Eng., 2012, vol. 51, no. 3.
10. Ruzhentsev N.V. “Compact 3mm wave band transceivers for technological radars and radiotelephone communication systems”, Turkish Journal of Physics, vol.20, N4, 1996, pp.356-358.

11. Odokienko O.V., Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V., Volosyuk V.K., Zhyla S.S. Two Frequency Radiometric Complex for Atmosphere Research // Proceedings of the 14-th International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2018), Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2018, p. 28 – 31.
12. Pavlikov V. V. , Ruzhentsev N. V. , Sobkolov A. D. , Salnikov D. S. Tsopa, A. I. Ground-based radiometric complex of millimeter wave band for meteorology and telecommunications applications // International journal «Telecommunication and Radio Engineering».– Begell House, 2017. – Vol. 76, issue 16.– pages 1477-14.
13. Tsopa A.I., Ivanov V.K., Leonidov V.I., Maleshenko Yu.I., Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V. and Zarudniy A.A. The research program of millimetric radio waves attenuation characteristics on perspective communication lines of Ukraine, " 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, 2016, pp. 638-642.
14. Strelnitskiy A.A., Strelnitskiy A.E., Tsopa O.I. and Shokalo V.M., “Prediction model of energy security for the systems of subscriber radio access with branched street and corridor communications channels,” Radioelectronics and Communications Systems, Allerton Press, Inc., 2011, vol. 54, no. 2, pp. 61-67.
15. 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.
16. Худсон Д. Статистика для физиков. – М.: Мир, 1967. – 242 с.
17. Ruzhentsev N. V. Complex Research of Parameters of Radiation of Axisymmetrical Antennas with Small Aperture at Millimeter Waves Band // Proc. of Int. Kharkov Symposium – Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), June 21-24, Kharkov, Ukraine, 2016, 4 pp.
18. Шифрин Я.С. Антенны / Харьков: ВИРТА им. Говорова Л.А., 1976. – 408 с.

19. J. Leech, B. K. Tan, G. Yassin, P. Kittara, S. Wangsuya, J. Treuttel, M. Henry, M. L. Oldfield, and P. G. Huggard, "Multiple flare-angle horn feeds for sub-mm astronomy and cosmic microwave background experiments," *Astron. Astrophys.*, vol. 532, p. A61, Aug. 2011.
20. Xing-Hui Yin, Sc Shi A simple design method of multimode horns \\\nIEEE Transactions on Antennas and Propagation 53(1) february 2005:455 – 459.
21. Радиотеплолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко, Г. Г. Щукин, Л. П. Бобылев, С. Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 283 с.
22. Rec. ITU-R P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.
23. Rec. ITU-R P.838 Definition of availability for radiocommunication circuits in the mobile-satellite service
24. J. Seybold, Introduction to RF propagation, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005
25. R. L. Freeman, Radio System Design for Telecommunications, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
26. <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>,