ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Аналіз поширення радіохвиль в наземних системах прямої видимости»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Михайло ДЕМИДОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)*

Виконав: здобувач вищої освіти
студент гр. ТСМД-62
Михайло ДЕМИДОВ
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: Сергій МАРКОВ
к.т.н., доцент *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Рецензент:
_____ _____
(науковий ступінь, вчене звання) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Демидову Михайлу Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Аналіз поширення радіохвиль в наземних системах прямої видимости
керівник кваліфікаційної роботи Сергій МАРКОВ, к.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від « 30 » жовтня 2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1) матеріали для розрахунків якісних показників лінії зв'язку;
2) матеріали по розрахунку наземних систем прямої видимості;
3) дані про характеристику місцевості, для розрахунку прикладу визначення показників якості радіолінії;
4) матеріали по оформленню пояснювальної записки і креслень.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
1) вступ;
2) розповсюдження радіохвиль в вільному просторі;
3) вплив земної поверхні на розповсюдження радіохвиль;
4) особливості розповсюдження ультракоротких радіохвиль в навколоземному просторі;
5) якісні показники радіорелейної лінії зв'язку;
6) приклад розрахунку радіорелейної лінії та її якісних показників.

5. Перелік графічного матеріалу: ___презентація на__слайдах_____

6. Дата видачі завдання «_01_» _жовтня_ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	05.10.2025	
2	Розповсюдження радіохвиль в вільному просторі	10.10.2025	
3	Вплив земної поверхні на розповсюдження радіохвиль	15.10.2025	
4	Особливості розповсюдження ультракоротких радіохвиль в навколоземному просторі	30.10.2025	
5	Якісні показники радіорелейної лінії зв’язку	15.11.2025	
6	Приклад розрахунку радіорелейної лінії та її якісних показників	10.12.2025	
7	Висновки	25.12.2025	

Здобувач вищої освіти _____ Михайло ДИМИДОВ
(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім’я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 67 стор., 19 рис., 10 табл., 21 джерел.

Мета роботи – аналіз методів розрахунку цифрових наземних радіоліній прямої видимості; визначення якісних показників цифрових радіоліній прямої видимості; розрахунок прикладу радіорелейної лінії та визначення її якісних характеристик.

Об’єкт дослідження – радіолінії зв’язку прямої видимості та методи їх розрахунку.

Предмет дослідження – якісні характеристики цифрових радіоліній прямої видимості та їх розрахунок.

Короткий зміст роботи: в результаті дослідження показана відмінність розрахунку аналогових та цифрових наземних ліній прямої видимості, наведений приклад, що демонструє застосування методів розрахунку якісних характеристик цифрових радіорелейних ліній.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РАДІОРЕЛЕЙНА ЛІНІЯ, БІТОВІ ПОМИЛКИ, ЛІНІЯ, КОЕФІЦИЄНТ НЕГОТОВНОСТІ, ПРОСТОРОВЕ РОЗНЕСЕННЯ, ЧАСТОТНИЙ ПЛАН.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work:
67 pages, 19 pictures, 10 table, 21 sources.

The purpose of the work is to analyze the methods of measuring digital terrestrial radio lines directly visually; the meaning of these displayed digital radio lines is directly visual; Reasonable applications of the radio relay line and the importance of these characteristics.

The object of consideration is the radii of action that are directly visible and the methods of exposing them.

The subject of consideration is the lowest characteristics of digital radio lines directly visually and in their images.

A brief overview of the work: as a result of the study, it turned out that the difference between traditional and digital land lines is quite obvious, the following applications demonstrate the reliability of methods of increasing the characteristics of digital radio relay lines.

KEY WORDS: RADIO RELAY LINE, BIT ERRORS, LINE, FAILURE COEFFICIENT, SPATIAL DIFFERENCE, FREQUENCY PLAN.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Демидов М.О. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: « Аналіз поширення радіохвиль в наземних системах прямої видимости».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Демидов М.О. під час написання роботи проявив себе як вдумливий та допитливий фахівець, показав гарну теоретичну підготовку. За короткий час їм було опрацьовано значну кількість літератури з проблем поширення радіохвиль в наземних системах прямої видимости та проведені необхідні розрахунки. Працюючи над завданнями, які доручалися керівником роботи, студент проявив ініціативу творчість і спроможність до інженерної праці.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Демидова М.О. на оцінку « відмінно » та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Демидов М.О. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього рівня магістра

здобувача вищої освіти Демідова Михайла Олексійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

На тему: «Аналіз поширення радіохвиль в наземних системах прямої видимости».

Актуальність

Цифрові радіорелейні лінії зв'язку широко використовуються на мережі зв'язку України. Вони дозволяють передавати інформацію з великою швидкість і високою якістю, але проектування таких ліній відрізняється від проектування аналогових, тому задача аналізу розповсюдження радіохвиль та врахування результатів аналізу при проектуванні є актуальною.

Позитивні сторони

Вирішені всі задачі, що поставлені в завданні на роботу: розглянуто загальний блок питань, що пов'язані з принципами та організацією радіорелейного зв'язку; проведений аналіз впливу на розповсюдження радіохвиль характеру траси лінії, стану навколоземної атмосфери та інших чинників; розглянуто відмінності в розрахунках для аналогових та цифрових ліній та вплив різних факторів на якість зв'язку. Розрахунки та оформлення роботи виконані із застосуванням обчислювальної техніки. При оформленні результатів розрахунків також застосована обчислювальна техніка.

Недоліки

1. При розрахунку конкретного прикладу не розглянута можливість впливу радіохвилі, яка може бути відбита від земної поверхні.
2. В прикладі також не вказано тип апаратури радіорелейної лінії.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи.

Висновок: *кваліфікаційна магістерська робота заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Демидов М.О. заслуговує присвоєння кваліфікації:*

Магістр з електронний комунікацій та радіотехніки.

Рецензент: _____ _____ _____
(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ЗМІСТ

ЗМІСТ 8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 10
ВСТУП 11
1 ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРІ 12
1.1 Формула ідеальної радіопередачі 12
1.2 Область простору, що є суттєвою при поширенні радіохвиль 17
2 ВПЛИВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ 20
2.1 Поглинання радіохвиль різними видами земної поверхні 20
2.2 Відбиття плоских радіохвиль на межі «повітря - гладка поверхня Землі» 23
2.3 Відбиття радіохвиль від шорсткої поверхні Землі 25
2.4 Класифікація випадків поширення земних радіохвиль 27
2.5 Поле випромінювача, що піднятий над плоскою земною поверхнею 28
2.6 Дифракція радіохвиль на сферичній земній поверхні 30
3 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ХВИЛЬ У ПРИЗЕМНОМУ ПРОСТОРІ 31
3.1 Загальні поняття 31
3.2 Поширення УКХ у межах прямої видимості 31
3.3 Поширення УКХ над пересіченою місцевістю та у містах 33
3.4 Поширення УКХ на великі відстані в умовах над рефракції 36
3.5 Розсіювання УКХ на неоднорідностях тропосфери 37
3.6 Розсіювання та відбиття метрових хвиль в іоносфері 39
4 ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ ЛІНІЇ 40
4.1 Моделювання ліній та визначення якісних показників зв'язку 40
4.2 Характеристики якості 41
4.3 Методи покращення надійності зв'язку 44
4.4 Методика розрахунку показників якості 46
4.4.1 Необхідний запас на завмирання 47

4.4.2 Атмосферні втрати 49
4.4.3 Можливість порушення зв'язку через інтерференцію радіо променів 50
4.4.4 Ймовірність порушення зв'язку, спричинена дощем 53
4.4.5 Рефракція радіохвиль 54
5 РОЗРАХУНОК РАДІОРЕЛЕЙНОЇ ЛІНІЇ І ПОКАЗНИКІВ ЇЇ ЯКОСТІ 56
5.1 Розташування станцій 56
5.2 Розрахунок профілів інтервалів 58
5.3 Визначення висот підвісу антен 60
5.4 Результати розрахунку якісних показників ділянки РРЛ 63
ВИСНОВКИ 65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 66
ПРЕЗЕНТАЦІЯ 68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення	Повне формулювання
РРЛ	Радіорелейна лінія
РРС	Радіорелейна станція
РРСП	Радіорелейна система передачі
ЦРРС	Цифрова радіорелейна станція
НВЧ	Надвисокі частоти
УВЧ	Ультрависокі частоти
ОЦК	Основний цифровий канал
МСЭ	Міжнародна спілка електрозв’язку
ПЦІ	Плезіохронна цифрова ієрархія
СЦІ	Синхронна цифрова ієрархія
ТМЗК	Телефонна мережа загального користування
КС	Кінцева станція
ПС	Проміжна станція
ВС	Вузлова станція
ППП	Приймально-передавальний пристрій
ГЕЦЛ	Гіпотетична еталонна цифрова лінія
ЛУНР	Лінія умовного нульового рівня
ES	Errored Second (кількість секунд з помилками)
SES	Severely Errored Second (кількість секунд з багатьма помилками)
ESR	Errored Second Ratio (ESR =ES/T) (коефіцієнт секунд с блочними помилками)
SESR	Severely Errored Second Ratio (SESR = SES/T) (коефіцієнт секунд с значною кількістю помилок)

ВСТУП

Наразі поширення одержали дві технології побудови транспортних мереж зв'язку: на основі волоконно-оптичних систем і систем радіозв'язку [1]. Перші характеризуються високою пропускною здатністю, але вимагають значного часу на реалізацію проекту, тому волоконна оптика знайшла застосування у операторів міжміського і міжнародного зв'язку. Системи радіозв'язку дозволяють гнучке та оперативне охоплення великої території, але мають обмежену пропускну здатність, що часто обумовлене кількістю частот, що видані тому чи іншому оператору.

Одним з економічних і швидких способів організації радіопередачі інформаційно-транспортних потоків на великі відстані є радіорелейний зв'язок [2, 3]. Раніш апаратура лінії, що забезпечують такий зв'язок, була аналоговою, зараз їй на зміну прийшли сучасні цифрові радіорелейні станції (ЦРРС), що мають високу пропускну здатність. Працюють вони, як правило, у діапазоні частот 3,4-11,7 ГГц. Їх пропускна здатність складає 155 Мбіт/с і більш, передача сигналів ведеться з використанням багатопозиційних видів модуляції. Для ЦРРС наявні системи телеобслуговування, які програмно підтримують рівень управління мережею та забезпечують контроль, управління і технічне обслуговування устаткування.

Перевага радіорелейних систем над дротовими і супутниковими ґрунтується на наступних чинниках: відносна дешевизна; швидкість розгортання; гнучкість мереж; оптимальне вирішення потреб сучасних галузей техніки (нафто і газодобувна галузь, електроенергетика, які вимагають забезпечення зв'язку на великих відстанях і у важкодоступних районах, а також протягом усієї траси трубопроводів та ліній електропередачі).

Розрахунок та проектування цифрових радіорелейних ліній відрізняється від аналогових, важливою є задача вивчення та застосування методів проектування цифрових радіорелейних ліній, тому тема роботи є актуальною.

1 ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРІ

1.1 Формула ідеальної радіопередачі

Радіохвилі різних діапазонів частот поширюються по-різному в навколоземному просторі і це необхідно враховувати під час проектування відповідних ліній зв'язку [4-6]. Для систем радіозв'язку прямої видимості використовуються метрові, дециметрові та сантиметрові радіохвилі, тому подальший розгляд стосується лише радіохвиль цих діапазонів.

Система передачі інформації складається з трьох основних частин [7]: передаючого пристрою, приймального пристрою і проміжної ланки – з’єднувальної лінії. Проміжною ланкою РРЛ є середовище - простір, в якому поширюються радіохвилі. При поширенні радіохвиль по природних трасах, тобто в умовах, коли середовищем є земна поверхня, атмосфера, космічний простір, середовище є тією ланкою радіосистеми, яка практично не піддається управлінню.

При поширенні радіохвиль у середовищі відбуваються зміна амплітуди поля хвилі, зміна швидкості і напряму поширення, поворот площини поляризації і спотворення сигналів, що передаються. У зв'язку з цим, проектуючи лінії радіозв'язку, необхідно:

розрахувати потужність передаючого пристрою або потужність сигналу на вході приймального пристрою (визначити енергетичні параметри ліній);

визначити оптимальні робочі хвилі за умов поширення;

визначити справжню швидкість і напрям приходу сигналів;

врахувати можливі спотворення переданого сигналу та визначити заходи щодо їх усунення.

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

Земна поверхня надає суттєвий вплив на поширення радіохвиль:

- у напівпровідній поверхні Землі радіохвилі поглинаються;

- при падінні на земну поверхню вони відбиваються;

- сферична форма земної поверхні перешкоджає прямолінійному поширенню радіохвиль.

Радіохвилі, що розповсюджуються в безпосередній близькості від поверхні Землі, називають земними радіохвилями (рис. 1.1). Розглядаючи поширення земних хвиль, атмосферу вважають середовищем без втрат із відносною діелектричною проникністю ε, що дорівнює одиниці. Вплив атмосфери враховують окремо, внесенням необхідних поправок.

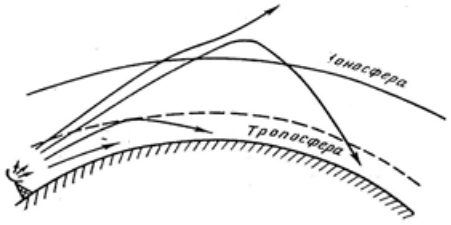


Рис. 1.1 Шляхи поширення радіохвиль

У Земної атмосфері розрізняють три області, які впливають на поширення радіохвиль: тропосферу, стратосферу і іоносферу. Кордони між цими областями виражені не різко і залежить від часу і географічного місця.

Тропосферою називається приземний шар атмосфери, що тягнеться до висоти 7-18 км. В області тропосфери температура повітря з висотою зменшується. Тропосфера неоднорідна як у вертикальному напрямку, так і вздовж земної поверхні. Її електричні параметри змінюються при зміні метеорологічних умов. У тропосфері відбувається викривлення траєкторії земних радіохвиль (рефракція). Поширення тропосферних радіохвиль можливе за рахунок розсіювання та відбиття їх від неоднорідностей тропосфери. Радіохвилі міліметрового та сантиметрового діапазонів у тропосфері поглинаються.

Стратосфера тягнеться до висот 50-60 км. Стратосфера відрізняється від тропосфери істотно меншою щільністю повітря і законом розподілу температури за

висотою: до висоти 30-35 км. температура постійна, а далі до висоти 60 км. різко підвищується. На поширення радіохвиль стратосфера має той самий вплив, що й тропосфера, але воно проявляється меншою мірою через малу щільність повітря.

Іоносфера - область атмосфери на висоті 60-10 000 км над земною поверхнею. На цих висотах щільність повітря дуже мала і повітря іонізоване, тобто є велика кількість вільних електронів. Присутність вільних електронів істотно впливає на електричні властивості іоносфери і зумовлює відбиття від іоносфери радіохвиль з довжиною хвилі більш 10 м. Радіохвилі, що розповсюджуються шляхом відбиття від іоносфери або розсіювання в ній, називають іоносферними хвилями. На умови поширення іоносферних хвиль властивості земної поверхні та тропосфери впливають мало.

Умови поширення радіохвиль при космічному радіозв'язку мають деякі специфічні особливості, але в радіохвилі основний вплив створює атмосфера Землі.

Вільний простір можна розглядати як однорідне середовище, що не поглинає, з ε =1. Насправді таких середовищ не існує, проте вирази, що описують умови поширення радіохвиль у цьому найпростішому випадку, є фундаментальними. Поширення радіохвиль у складніших випадках характеризується тими самими виразами з внесенням у них множників, що враховують вплив конкретних умов поширення.

Для проектування різних радіосистем необхідно визначати напруженість електричного поля радіохвилі в місці прийому або потужність на вході приймального пристрою.

Для вільного простору щільність енергії П(Вт/м^2) на відстані r(м) від точкового джерела, що випромінює радіохвилі рівномірно у всіх напрямках, пов'язана з потужністю, що випромінюється цим джерелом $P_{випр}$(Вт), наступним виразом:

$$\text{П} = P_{випр} \Big/ 4\pi r^2 ,$$

де П – модуль вектору Пойнтінга.

Насправді антена випромінює енергію в різних напрямах нерівномірно. Для врахування ступеня нерівномірності випромінювання вводять коефіцієнт направленої дії антени.

Коефіцієнт направленої дії антени D показує, у скільки разів змінюється щільність потужності на даній відстані від випромінювача при направленому випромінювачі порівняно з ненаправленим (ізотропним) випромінювачем.

При використанні направленого випромінювача відбувається просторовий перерозподіл потужності, внаслідок чого в деяких напрямках щільність потужності підвищується, а в інших знижується порівняно з випадком використання ізотропного випромінювача. Застосування направлених антен дозволяє отримати в D разів більшу щільність потужності в точці прийому або в D разів знизити потужність передавача.

Величина D є функцією кутів спостереження: у горизонтальній площині ξ та у вертикальній θ (рис. 1.2). Зазвичай антена створює максимальне випромінювання лише у напрямку (ξ_0, θ_0), при котрому D набуває максимальне значення $D_{макс}=D(\xi_0, \theta_0)$. Залежність величин D від кутів ξ і θ називають діаграмою спрямованості антени за потужністю, а відношення

$$F^2(\xi,\theta) = D(\xi\ \theta)/D_{макс}$$

- нормованою діаграмою направленості за потужністю (рис. 1.2).

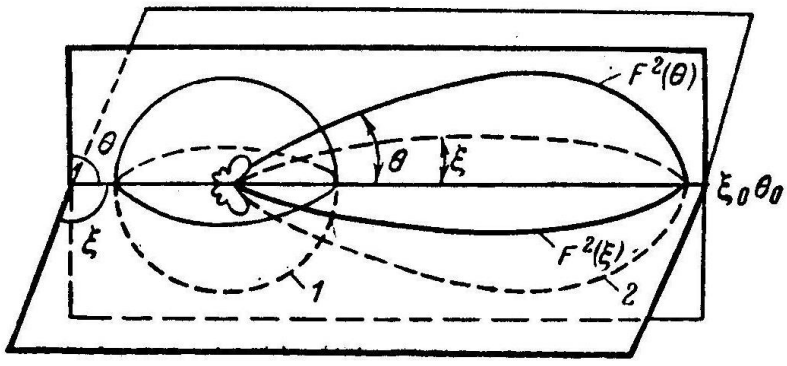


Рис. 1.2 Діаграми направленості антени за потужністю

1 – ізотропного випромінювача; *2* – направленої антени

Щільність потужності на відстані r від направленої антени:

$$\Pi = P_{випр} D_{макс} F^2(\xi,\theta) \big/ 4\pi r^2 .$$

Амплітуда напруженості електричного поля радіохвилі у вільному просторі зв'язана з щільністю енергії хвилі через опір вільного простору Z_0 виразом:

$$E^2_{\text{m випр}} = 2Z_0 \Pi = 240\pi \Pi,$$

звідси визначається амплітудне значення напруженості електричного поля в вільному просторі $E_{\text{m випр}}$ (В/м) на завданої відстані r (м) від випромінювача:

$$\text{E}_{m\,\text{в}} = \sqrt{60\text{P}_{\text{випр}} D_{\text{макс}}} \frac{F(\xi,\theta)}{r} \qquad (1.1)$$

Потужність на вході приймача, що узгоджений з антеною, яка знаходиться на відстані r від випромінювача, дорівнює

$$P_{пр.в.} = \Pi A_{еф} = A_{еф} E^2_{m\,в} \big/ 240\pi , \qquad (1.2)$$

де $A_{еф} = D_{пр}\lambda^2 \big/ 4\pi$ — ефективна площа приймальної антени, що характеризує площу фронту хвилі, з якого антена приймає енергію.

Потужність $P_{\text{пр.в}}$ зручно визначити через потужність $P_{\text{випр}}$ та величину $D_{\text{випр}}$ антени, що випромінює:

$$P_{пр.в.} = P_{випр} D_{випр} D_{пр} \lambda^2 \big/ (4\pi r)^2 \qquad (1.3)$$

Цей вираз має назву формула ідеальної радіопередачи.

Ослаблення потужності при поширенні радіохвиль у вільному просторі, яке визначається як відношення $P_{\text{пр.в}}/P_{\text{випр}}$, має назву втрати передачі у вільному просторі. Якщо приймальна та передавальна антени ненаправлені це відношення B_0 (дБ) розраховується за формулою:

$$B_0 = 10\lg\left(\frac{P_{\text{пр.в.}}}{P_{\text{випр}}}\right) = -33 - 20(lgr + lgf), \qquad (1.4)$$

де P — потужність, Вт; r — відстань, км; f — частота, МГц.

Застосування направлених антен еквівалентно збільшенню випромінюваної потужності в $D_{\text{випр}} * D_{\text{пр}}$ разів.

Поляризація радіохвиль визначається орієнтуванням вектору напруженості електричного поля радіохвилі у просторі, напрям вектору визначає напрямок поляризації. Залежно від зміни напрямку вектору *E*, поляризація може бути лінійною, круговою та еліптичною. Вид поляризації радіохвиль у вільному просторі визначається типом випромінювача (антени). Наприклад, антена-вібратор випромінює у вільному просторі лінійно поляризовану хвилю.

Для отримання хвиль з круговою поляризацією достатньо мати в якості передавальної антени два лінійні вібратори, що зміщених у просторі на 90° один щодо іншого і живити їх струмами рівної амплітуди зі зсувом по фазі на 90°. Радіохвилі з круговою поляризацією випромінюють, наприклад, спіральна і турнікетна антени.

Еліптично поляризована хвиля може бути створена, наприклад, за допомогою антен, у вигляді двох схрещених вібраторів, плечі яких живлять струмами з різною амплітудою.

Для ефективного прийому характер поляризації поля прийнятої хвилі та поляризаційні властивості приймальної антени повинні збігатися. Формули (1.2) і (1.3) справедливі у разі збігу характеру та напряму поляризації електричного поля та приймальної антени. Якщо збіг відсутній, потужність у приймальні антени зменшується, і в зазначені формули вводяться поправки. Наприклад, для найбільш ефективного прийому хвилі з лінійною поляризацією вібратор приймальної антени повинен бути орієнтований паралельно вектору *E*. Якщо напрям вектору *E* перпендикулярний до осі приймального вібратора, то прийому не буде.

1.2 Область простору, що є суттєвою при поширенні радіохвиль

На формування поля поблизу приймальної антени (рис. 1.3, а) різні області вільного простору, через яке проходять радіохвилі від випромінювача А, впливають різною мірою [1, 5]. Випромінювач створює сферичну хвилю, кожен елемент фронту якої знову є джерелом сферичної хвилі. Нова хвильова поверхня знаходиться як огинаюча вторинних сферичних хвиль. Поле на певній відстані від випромінювача

визначається сумарною дією вторинних джерел. Основний внесок у цю суму дають джерела, які розташовані поблизу прямої АВ. Дія вторинних суміжних випромінювачів, розташованих на значній відстані від цієї прямої, взаємно компенсується.

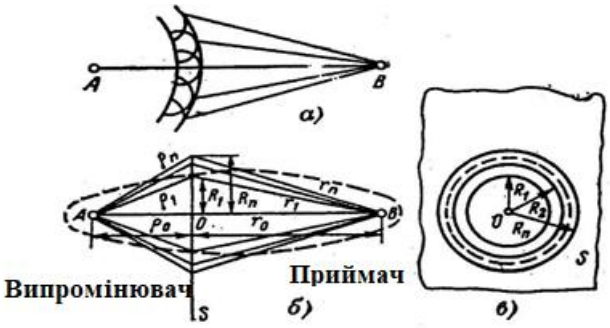


Рис. 1.3 Визначення зон Френзеля

а – формування хвилевого фронту; *б* – визначення розмірів зон Френзеля та конфігурація 1-й зони; *в* - проекція зон Френзеля на площину, що перпендикулярна до напрямку траси

Областю, суттєвою при поширенні радіохвиль, називають частину простору, в якому поширюється основна частка енергії. Неоднорідності середовища (перешкоди на шляху хвилі) впливають на характеристики поля у точці прийому, якщо вони охоплені областю, істотною під час поширення. Ця область має конфігурацію еліпсоїда обертання з фокусами в точках А і В (рис. 1.3,б). Радіус поперечного перерізу еліпсоїда на відстані від точки А та відстані r_0 від точки В визначається рівністю:

$$\rho_n + r_n = \rho_0 + r_0 + n\cdot(\lambda/2),$$

та може бути розрахований з виразу:

$$R_n = \sqrt{\frac{\lambda \rho_0 r_0}{\rho_0 + r_0} n},$$

де n - ціле число.

Кільцеву область з радіусами R_n, що побудована на площині S, яка перпендикулярна до лінії АВ, називають зоною Френзеля номеру n (рис. 1.3, в).

Якщо на шляху поширення хвилі є екран з круглим отвором (площина екрану перпендикулярна лінії АВ), то при зміні радіусу отвору (або переміщенні екрану вздовж траси) напруженість поля в точці В буде періодично змінюватися (рис. 1.4).

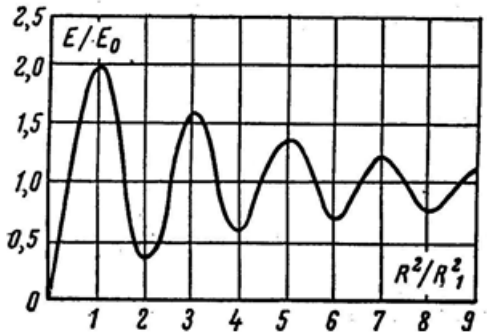


Рис. 1.4 Зміна напруженості поля за екраном з круглим отвором при зміні радіусу отвору R (R_1 – радіус першої зони Френзеля)

Напруженість поля буде максимальною, коли радіус отвору в екрані дорівнює радіусу першої зони Френзеля і радіусам зон Френзеля з наступними непарними номерами. При більшому розмірі отвору (більше радіусу шостої зони Френзеля) амплітуда напруженості поля прагне до значення $E_{\text{т.в}}$ (рис. 1.4), тому радіус поперечного перерізу області, істотної при поширенні, вважають рівним радіусу зони Френзеля з номерами 6-10. Однак, для орієнтовних розрахунків часто розмір суттєвої області можна прийняти рівним радіусу першої зони Френзеля.

2 ВПЛИВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

2.1 Поглинання радіохвиль різними видами земної поверхні

Кінцеві пункти радіоліній у більшості випадків розташовані в безпосередній близькості від Землі. Присутність напів проводячої поверхні Землі викликає поглинання і відбиття радіохвиль, іноді із зміною поляризації хвилі [5]. Кількісно ці явища залежать від електричних параметрів земної поверхні: діелектричної проникності та провідності (таблиця 2.1). Величини ε и σ визначаються експериментально по поглинанню радіохвиль земною поверхнею та відбиттю від неї та залежать від структури земної поверхні, її вологості, шаристості, температури, а також від робочої частоти.

З таблиці 2.1 видно, що з підвищенням частоти (зменшенням λ) ε морської та прісної води зменшується. Це викликано тим, що молекули води поляризуються і при підвищенні частоти не встигають орієнтуватися в напрямку електричного поля.

Грунт є складним діелектриком, що складається з твердого компонента сухого ґрунту і рідкого компонента водного розчину солей. Величини ε і σ рідкого компонента істотно більше, ніж твердого компонента, і електричні параметри ґрунту визначаються в основному властивостями рідкого компонента.

Умови поширення радіохвиль у середовищі характеризуються тангенсом кута втрат у середовищі, чисельне рівним відношенню щільністей струмів провідності та зміщення:

$$tg\ \varphi_e = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon} = 60\frac{\sigma\lambda}{\varepsilon},$$

Якщо $60\frac{\sigma\lambda}{\varepsilon}$ <<1, то в середовищі переважає струм зміщення, і воно за своїми властивостями наближується до діелектрику. Якщо $60\frac{\sigma\lambda}{\varepsilon}$ >>1, то в середовищі переважає струм провідності і його властивости наближаються до властивостей провідника. Рівність щільністей струмів провідності і струмів зміщення настає при певної граничної довжині хвилі $\lambda_{гр}$. Для морської води:

$$\lambda_{\text{ГР}} = \frac{\varepsilon}{60\sigma} = \frac{80}{60 \cdot 4} \approx 0{,}33\text{м}.$$

Тому для радіохвиль сантиметрового діапазону морська вода може розглядатися як діелектрик. Для вологого ґрунту:

$$\lambda_{ГР} = \frac{10}{60 \cdot 10^{-2}} \approx 17\ м\ .$$

Таблиця 2.1

Значення діелектричної проникності і провідності для типових видів земної поверхні

Вид земної поверхні або покрову	Довжина хвилі, м	ε	σ, См/м
Морська вода ($t = 20^0$ C)	>1,0 0,1 0,03 0,003	78 70 40 10	5,0 5,0 20,0 5,0
Прісна вода ($t = 20^0$ C)	>1,0 0,1 0,03 0,003	90 80 40 10	$2 \cdot 10^{-2}$ 5 20 5
Вологий грунт ($t = 20^0$ C)	>1,0 0,1 0,03	15-30 15-30 10-15	10^{-2} -10^{-1} $(1\text{-}5) \cdot 10^{-1}$ 1-3
Сухий грунт ($t = 20^0$ C)	>1,0 0,1 0,03	3-6 3-6 2-5	10^{-4} -$2 \cdot 10^{-1}$ $5 \cdot 10^{-3}$-$7 \cdot 10^{-2}$ 10^{-1} -$2 \cdot 10^{-1}$
Лід ($t = -10^0$ C)	>1,0 0,1 0,03	4-5 3,5 3,2	10^{-2} -10^{-1} 10^{-4}-10^{-3} 10^{-4}-10^{-3}
Сніг ($t = -10°$ C)	>1,0 0,1 0,03	1,2 1,2 1,2	10^{-6} 10^{-5} 10^{-5}
Мерзлий грунт ($t = -35°$ C)	>1,0 0,1 0,03	3—7 — —	10^{-3}—10^{-2} — —
Ліс	>10 0,1—5	1,04 1,4	10^{-6} — 10^{-5} 10^{-5} — 10^{-3}

Вологий грунт для метрових та коротших хвиль може розглядатися як діелектрик. Для хвиль сантиметрового діапазону всі види земної поверхні мають властивості, близькі до властивостей ідеального діелектрика.

При поширенні радіохвиль у напівпровідному середовищі амплітуда поля зменшується з відстанню за експоненційним законом, а фаза змінюється лінійно. Миттєве значення напруженості поля хвилі, що розповсюджується в напівпровідному середовищі в напрямку однієї з координатних осей, може бути записане у наступному вигляді:

$$E = E_{m.в} e^{-\alpha_r} \cos(\omega t - \beta), \qquad (2.1)$$

де $E_{m.в}$ визначається з (1.1).

Величина α характеризує втрати енергії в середовищі і має назву коефіцієнт загасання. Фізично втрати обумовлені переходом енергії електромагнітних хвиль в теплову енергію руху молекул. Величина β (коефіцієнт фази) характеризує зміну фази хвилі. Ці величини можна записати в наступному вигляді:

$$\alpha = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\sqrt{\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\varphi_e}-1}; \qquad (2.2)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c}\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\sqrt{\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\varphi_e}+1}. \qquad (2.3)$$

Швидкість переміщення заданої фази в напрямку поширення хвилі $v_ф$, має назву фазова швидкість та зв'язана з величиною β наступним виразом:

$$v_ф = \omega/\beta. \qquad (2.4)$$

Відношення

$$n = c/v_ф = \beta c/\omega. \qquad (2.5)$$

Має назву показник заломлення середовища.

Довжина хвилі в середовищі дорівнює:

$$\lambda_{ср} = 2\pi/\beta = \lambda/n.$$

При $tg\varphi_e$<<1:

$$\alpha \approx \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{\varepsilon}};\quad \beta \approx \frac{\omega\sqrt{\varepsilon}}{c} = \frac{2\pi}{\sqrt{\varepsilon}\,\lambda};\quad n \approx \sqrt{\varepsilon};\quad \lambda_{ср} = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon}}.$$

При $tg\varphi_e$>>1:

$$\alpha \approx 2\pi\sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}};\ \beta \approx 2\pi\sqrt{\frac{30\sigma}{\lambda}};\ v_ф = \frac{c}{\sqrt{30\sigma\lambda}};\ n = \sqrt{30\sigma\lambda};\ \lambda_{ср} \approx \frac{\lambda}{\sqrt{30\sigma\lambda}}.$$

Поглинання радіохвиль в середовищі описується інтегральним коефіцієнтом Г и вимірюється в дБ:

$$Г = 20 \cdot \lg \frac{E_{m\,св}}{E_m} = 10 \cdot \lg \frac{P_{пр.св}}{P_{пр}} = 8{,}6\ \alpha r. \qquad (2.6)$$

Погонне поглинання вимірюється в дБ на метр:

$$Г_{1м} = 8{,}6\alpha.$$

Відстані, на яких відбувається ослаблення Em в 10^6 разів (на 120 дБ) при поширенні радіохвиль в вологому грунті та морської воді, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Відстані ослаблення радіохвиль на 120 дБ

f, МГц	λ, м	Відстані ослаблення радіохвиль, м	
		Вологий грунт	Морська вода
100	3	23	0,37
1	300	70	3,5
0,01	30000	700	35

Для здійснення радіозв'язку через товщу земної поверхні або моря (наприклад, для зв'язку з підводними човнами, що знаходяться в зануреному стані) застосовуються тільки довгі і наддовгі хвилі.

2.2 Відбиття плоских радіохвиль на межі «повітря - гладка поверхня Землі»

Електромагнітна хвиля, падаючи на гладку межу розділу двох середовищ (рис.

2.1), частково відбивається від цієї межі (кут падіння дорівнює куту відбиття) і частково проходить углиб другого середовища. Тому в першому середовищі є падаюча і відбита хвилі, а в другій - заломлена хвиля [6].

Залежно від напрямку вектору *E* щодо поверхні Землі розрізняють два види поляризації — вертикальну та горизонтальну. При вертикальній поляризації вектор напруженості електричного поля лежить у площині падіння хвилі, тобто у площині, перпендикулярній до площини розділу і проходить через напрямок поширення падаючої хвилі (рис. 2.1,б). При горизонтальній поляризації вектор напруженості електричного поля паралельний площині розділу (рис. 2.1, а).

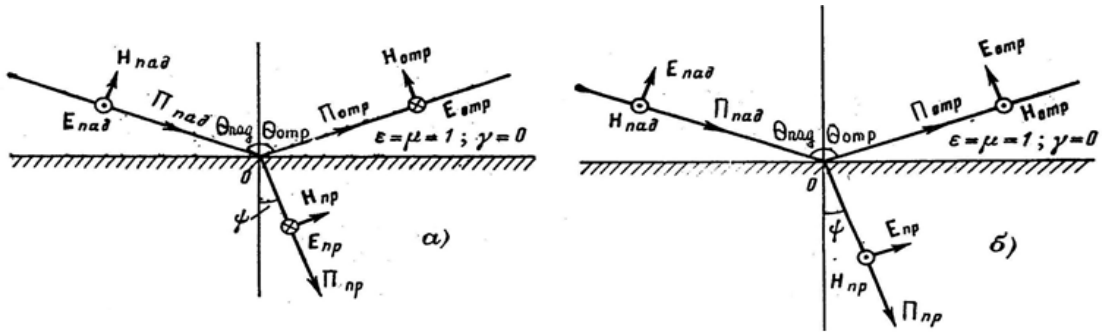


Рис. 2.1 Визначення коефіцієнту відбиття

а) горизонтальна поляризація, б) вертикальна поляризація

Коефіцієнт відбиття Френзеля є відношення комплексних амплітуд напруженістей полів падаючої та відбитої хвиль, визначених на ідеально гладкій плоскій поверхні розділу. Для вертикально і горизонтально поляризованих хвиль, що падають з вільного простору на напівпровідник, значення коефіцієнтів $\Gamma_в$ і $\Gamma_г$ розраховуються за формулами:

$$\Gamma_в = \frac{(\varepsilon - j60\sigma\lambda)cos\theta_{пад} - \sqrt{\varepsilon - j60\sigma\lambda - sin^2\theta_{пад}}}{(\varepsilon - j60\sigma\lambda)cos\theta_{пад} + \sqrt{\varepsilon - j60\sigma\lambda - sin^2\theta_{пад}}} = \Gamma_в e^{-j\Phi_в}; \qquad (2.7)$$

$$\Gamma_г = \frac{cos\theta_{пад} - \sqrt{\varepsilon - j60\sigma\lambda - sin^2\theta_{пад}}}{cos\theta_{пад} + \sqrt{\varepsilon - j60\sigma\lambda - sin^2\theta_{пад}}} = \Gamma_г e^{-j\Phi_г}, \qquad (2.8)$$

де $\theta_{пад}$ — кут падіння хвилі на границю розділу середовищ;

Φ — фаза коефіцієнта відбиття.

В деяких випадках необхідне знати напруженість поля або потужність хвилі, що проходить в друге середовище. Для цього використовується поняття коефіцієнту проходження F:

$$F = \dot{E}_{пр} \big/ \dot{E}_{пад} .$$

Коефіцієнт проходження можна виразити через коефіцієнт відбиття Г. При вертикальної поляризації:

$$F_{\text{в}} = (1 + \Gamma_{\text{в}})(\varepsilon - j60\sigma\lambda)^{-1/2}.$$

При горизонтальної поляризації:

$$\text{F}_{\Gamma} = (1+\Gamma_{\Gamma}).$$

2.3 Відбиття радіохвиль від шорсткої поверхні Землі

Природні земні покриви рідко є абсолютно рівною поверхнею. Найбільший вплив мають нерівності при відбитті ультракоротких і особливо сантиметрових і міліметрових радіохвиль. На відміну від гладкої поверхні шорстка поверхня створює відбитий сигнал не тільки у напрямку кута відбиття, рівного куту падіння, а й у інших напрямах, включаючи і зворотній. Тому наявність нерівностей призводить до зменшення ефективного коефіцієнту відбиття у напрямку дзеркального променю. Головним фактором у формуванні відбитого поля є фазові співвідношення, що визначаються різницею ходу хвиль від джерела випромінювання до елементів поверхні. Розсіяний сигнал може мати крім складової тієї ж поляризації, що і хвиля, що падає, складову, що має ортогональну поляризацію. Розрахунок напруженості поля розсіяних хвиль ведеться у випадку великих нерівностей за методом Кірхгофа, а у разі дрібних нерівностей - за методом збурень [5].

Поверхню можна вважати рівною, якщо максимальна висота нерівностей $h_{\text{н}}$ (рис. 2.2,а) задовольняє наступну нерівність, яка називається критерієм Релея:

$$h_н << \frac{\lambda}{8\cos\theta_{ПАД}}. \qquad (2.9)$$

На формування відбитої хвилі основний вплив створює ділянка поверхні, що обмежена 1-ї зоною Френзеля. При нормальному падінні хвилі на поверхню 1-а зона Френзеля являє собою коло радіусом R_1; при похилому — еліпс, велика вісь якого витягнута у бік поширення хвилі (рис. 2.2,б).

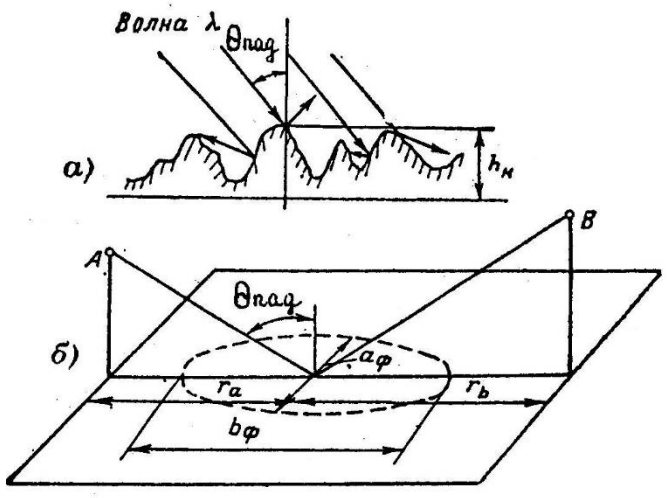


Рис. 2.2 Відбиття радіохвиль від нерівної поверхні Землі
а) пояснення критерію Релея, б) перша зона Френзеля

Розміри малої та великої пів осей еліпсу 1-й зони Френзеля відповідно дорівнюють:

$$a_ф = \sqrt{\frac{r_a r_b}{r_a + r_b}}\lambda;$$

$$b_ф = \frac{a_ф(r_a + r_b)}{\sqrt{4a_ф^2 + (r_a + r_b)^2\ \mathrm{ctg}\ \theta_{пад}}}, \qquad (2.10)$$

де r_a и r_b — відстані від кінців траси до точки геометричного відбиття;

$\theta_{пад}$ — кут падіння хвилі (рис. 2.2,б).

Критерій Релея отриманий виходячи з умови, що різниця фаз між відбитими від землі радіохвилями не перевищує значення π/2.

2.4 Класифікація випадків поширення земних радіохвиль

При розрахунку напруженості поля земних радіохвиль атмосферу приймають за середовище без втрат з ε=1, а необхідні виправлення, що враховують вплив атмосфери, вводять додатково.

Вплив земної поверхні на умови поширення радіохвиль можна звести до двох випадків: перший - випромінювач або приймальна антена підняті високо (в масштабі довжини хвилі) над поверхнею Землі, другий - передавальна і приймальна антени знаходяться в безпосередній близькості від Землі.

У першому випадку, типовому для ультракоротких і частково коротких радіохвиль, метод розрахунку напруженості поля залежить від протяжності радіолінії в порівнянні з відстанню «прямої видимості» (рис. 2.3), що обчислюється за формулою:

$$r_0 = \sqrt{2R_0}\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) = 3{,}57 \cdot 10^3\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right), \qquad (2.11)$$

де R_0 = 6,37 · 10⁶ м — радіус Землі;

h_1 и h_2 — висоти підняття антен, м.

При протяжності радіолінії r < <0,2 r_0 земну поверхню можна вважати плоскою, при $0{,}2r_0 < r < 0{,}8r_0$ вносяться поправки на сферичність земної поверхні, при $r > 0{,}8r_0$ розрахунок напруженості поля ведеться с урахуванням дифракції радіохвиль.

У другому випадку, що відноситься головним чином до середніх і довгих хвиль, при протяжності радіолінії не більше: 300-400 км (для λ, 200-20000 м); 50-100 км (для λ, 50-200 м); 10 км (для λ, 10-50 м) земна поверхня вважається плоскою. На радіолініях

більшої протяжності розрахунок напруженості поля ведеться з урахуванням рефракції.



Рис. 2.3 Відстань прямої видимості без врахування та з врахуванням рефракції

Вплив навколоземної атмосфери проявляється у явищі рефракції (огинання радіохвилями земної поверхні). Воно помітно проявляється у діапазонах довгих і середніх хвиль, а в діапазоні УКХ його можна не враховувати.

2.5 Поле випромінювача, що піднятий над плоскою земною поверхнею

У цьому випадку хвиля досягає земної поверхні на значній (в масштабі довжини хвилі) відстані від випромінювача і ділянка фронту хвилі поблизу земної поверхні може вважатися плоскою. На радіолінії малої протяжності $r < 0{,}2\ r_0$ поле в місці прийому є результатом інтерференції полів прямої хвилі і хвилі, відбитої від плоскої земної поверхні (рис. 2.4), причому напруженість електричного поля відбитої хвилі визначається за допомогою коефіцієнтів відбиття Френзеля. Пряма хвиля поширюється шляхом АВ, відбита шляхом АСВ, а лінія АТ є напрям максимального випромінювання передавальної антени. Результуюче поле визначається інтерференційною формулою [1]:

$$E_m = E_{m.\text{в}}\sqrt{1 + a^2 + 2a\cos z}, \qquad (2.12)$$

де $E_{m.\text{в}}$ визначається з (1.1),

$$\text{a} = \left|\Gamma_{\text{в.г}}\right|\left(\frac{\text{D}(\theta_2)}{\text{D}(\theta_1)}\right)^{1/2},$$

$$\text{z} = \frac{4\pi h_1}{\lambda}\cos\theta_{\text{пад}} + \Phi_{\text{в.г}}.$$

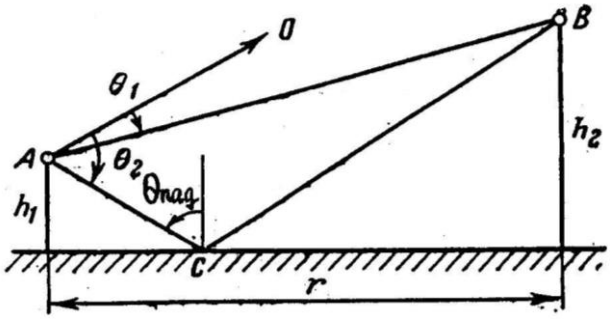


Рис. 2.4 Поширення хвиль при піднятих антенах

Кути θ_1 і θ_2 позначені на рис. 2.4. Множник у вигляді квадратного кореня в цієї формулі має назву інтерференційний множник.

Коефіцієнт відбиття від земної поверхні $\Gamma_{в.г}$ визначається для відповідної поляризації за формулами (2.7), (2.8). Для антен, що є слабо направленими (для них широкому інтервалі кутів $D(\theta_2)/D(\theta_1) \approx 1$), інтерференційна формула спрощується:

$$E_m = E_{m\,св}\sqrt{1+\left(\left|\Gamma_{в.г}\right|\right)^2+2\left(\left|\Gamma_{в.г}\right|\right)\cos z}. \qquad (2.13)$$

Присутність земної поверхні змінює розподіл поля випромінювача у вертикальній площині. Діаграма спрямованості системи випромінювач — Земля вирізана багатьма пелюстками, а діаграма спрямованості самого випромінювача $F(\theta)$ представляє огинаючу цих пелюсток.

Для практично важливого випадку поширення радіохвиль ковзними променями (θ прагне 90^0) формула (2.12) може бути піддана подальшому спрощенню. Враховуючи, що при цьому $|\Gamma_{в.г}| \approx 1$, $\Phi_{в.г} \approx 180^o$ (рис. 2.1), напруженість поля E_m(В/м) в залежності від відстані r (м), довжини хвилі λ (м), висоти розташування антен h_1, h_2 (м) та потужності P (Вт) визначається за формулою Б.А. Введенського:

$$E_m = \frac{4\pi\sqrt{60PD}}{\lambda}\frac{h_1 h_2}{r^2}. \qquad (2.14)$$

Якщо

$$18 \cdot \frac{h_1 h_2}{\lambda \cdot r} \leq 1,$$

то розрахунок за нею добре узгоджується з результатами вимірювання.

2.6 Дифракція радіохвиль на сферичній земній поверхні

Огинання радіохвилями перешкод, що зустрічаються на шляху їх поширення, називається дифракцією [5]. Коли протяжність радіолінії і висота розташування антен такі, що область, істотна при поширенні радіохвиль (1-а зона Френзеля), частково або повністю перекривається опуклістю земної поверхні, то незакрита частина 1-ї зони Френзеля або зон наступних номерів, що представляють сукупність джерел сферичних хвиль, створюють випромінення не тільки в напрямку руху хвилі, а й за опуклістю земної поверхні.

Відстань, що близька до межі прямої видимості, коли 1-а зона Френзеля закрита лише частково, називається областю півтіні. Відстані, у яких 1-а зона Френзеля перекрита повністю, називається областю тіні. У тіні розрахунок напруженості поля Em (мВ/м) ведеться за формулою запропонованої В.А. Фоком:

$$E_m = E_{m.в} G, \qquad (2.15)$$

де $E_{m.в}$ визначається за формулою (1.1); G — множник ослаблення, який є добутком трьох функцій, G = U(x)V(y_1)V (y_2), де U(x) — функція відстані від передавача, r (м); V(y_1) V(y_2) — функції висоти підняття антен, що передає h_1 та сприймає h_2, або, якщо функції виразити в дБ, то G (дБ) дорівнює:

$$G = U(x) + V(y_1) + V(y_2).$$

Розрахунок за цими формулами проводиться в основному для діапазону УКХ, де застосовують антени, що високо підняті над земною поверхнею. Розрахунок напруженості поля в діапазонах довгих, середніх і коротких хвиль, коли антени розташовані поблизу поверхні Землі, спрощується, оскільки V(y_1) = V(y_2) = 1.

3 ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ХВИЛЬ У ПРИЗЕМНОМУ ПРОСТОРІ

3.1 Загальні поняття

До діапазону ультракоротких хвиль (УКХ) відносять радіохвилі довжиною від 10 м до 1 мм (30 МГц $\div 3 \cdot 10^5$ МГц). У нижній межі частот діапазон УКХ примикає до діапазону КХ. Ця межа визначена тим, що на УКХ не може бути задоволена умова відбиття радіохвиль від іоносфери. У верхній межі частот УКХ межують з довгими інфрачервоними хвилями. Діапазон УКХ ділиться на під діапазони метрових, дециметрових, сантиметрових, міліметрових хвиль, кожен з яких має свої особливості поширення, але основні положення властиві всьому діапазону УКХ. Умови поширення залежать від довжини лінії зв'язку та специфіки траси.

Через малу довжину УКХ погано дифрагують на сферичної поверхні Землі та великих нерівностей земної поверхні чи інших перешкод. Антени прагнуть розташувати на значній висоті над поверхнею Землі, тому що при цьому, по-перше, збільшується відстань прямої видимості і, по-друге, зменшується екрануючий вплив місцевих предметів, що знаходяться поблизу антени. При цьому виконується умова, при якій висота розташування антени набагато більша за довжину хвилі і розрахунок напруженості поля можна вести за інтерференційними формулами (2.12), (2.13).

У діапазоні УКХ земна поверхня може розглядатися як ідеальний діелектрик, і властивості провідності земної поверхні слід враховувати тільки при поширенні метрових хвиль над морською поверхнею. Тому зміна властивостей провідності ґрунту (зміна його вологості) практично не позначається на поширенні УКХ. Але відповідно до (2.9) навіть невеликі нерівності земної поверхні істотно змінюють умови відбиття УКХ від Землі.

3.2 Поширення УКХ у межах прямої видимості

При відстанях, набагато менших межі прямої видимості, можна не враховувати

вплив сферичності Землі і вплив рефракції радіохвиль у тропосфері. Характерними особливостями поширення УКХ при цьому є велика стійкість і незмінність рівня сигналу в часі при стаціонарних передавачі та приймачі. Розрахунок напруженості поля можна вести за формулою Введенського (2.14), якщо виконуються умови її застосування. На лінії радіозв'язку Земля - літак або при радіолокаційному спостереженні літака сигнал флуктує завдяки зміні кута спостереження при руху літака і порізаності діаграми спрямованості системи випромінювач - Земля.

При відстанях, що знаходяться у межах $0{,}2\,r_0 < r < 0{,}8\,r_0$, необхідно враховувати вплив сферичності Землі. Одночасно слід враховувати вплив рефракції, використовуючи принцип еквівалентного радіусу Землі. За таких відстаней на поширення УКХ впливають і метеорологічні умови. Зі зміною коефіцієнта заломлення тропосфери змінюється кривизна траєкторії хвилі, причому для прямого і відбитого від земної поверхні променів ці зміни можуть виявитися різними. В результаті змінюється різниця фаз між прямим і відбитим променями, змінюється і рівень поля радіохвилі, відбуваються замирання сигналу. Замирання, що заважає, посилюється зі збільшенням відстані.

Відбиття УКХ від нерівної земної поверхні має особливе значення в радіолокаційній техніці. В основному вони мають розсіяний характер, причому частина відбитої енергії виявляється спрямованою до джерела. Такі відбиття найчастіше відносяться до сигналів, що заважають, які ускладнюють розпізнавання корисних радіолокаційних цілей. Однак відбиття від земної поверхні до джерела використовуються при проведенні спостережень за поверхнею Землі з повітря, наприклад, при вимірюванні висоти.

Випадкові значення амплітуди сигналу, випромінюваного радіолокатором, що рухається (наприклад, з літака) і відбитого земною поверхнею, підпорядковуються закону Релея. Тільки при відбитті від спокійної води та від рівних ділянок пустелі є постійна складова і закон розподілу амплітуд відповідає узагальненому закону Релея. Кореляційна функція сигналу описується експоненційним законом, причому масштаб

кореляції залежить як від висоти нерівностей, і від швидкості руху джерела.

3.3 Поширення УКХ над пересіченою місцевістю та у містах

Зазвичай вздовж лінії зв'язку на УКХ є великі чи малі нерівності, які впливають на поширення радіохвиль. У загальному випадку врахувати цей вплив неможливо. Для розрахунку напруженості електричного поля в кожному конкретному випадку необхідно побудувати профіль траси і в залежності від характеру цього профілю вести розрахунок тим чи іншим методом. Розглянемо кілька прикладів профілів трас.

Траса, що проходить над невеликими пологими пагорбами. На рис. 3.1,а, зображено профіль траси, при якому передавальна антена розташована на пологому схилі пагорба. У цьому випадку до приймальної антени можуть прийти прямий промінь АВ і три відбиті промені, AC_1B, AC_2B, і AC_3C_3'. При розрахунку напруженості електричного поля слід враховувати різницю фаз цих променів, обумовлену різницею ходу та різними умовами відбиття в точках C_1, C_2, і C_3', , і . В результаті розгляду такої картини можна отримати вираз для розрахунку напруженості поля, аналогічне інтерференційним формулам, але складніше. На рис. 3.1,б зображений профіль, при якому є певна височина в середині траси. У найпростішому випадку в точку В приходить тільки один промінь, що відбивається в точці С. Для розрахунку такої траси зручно ввести поняття приведених висот антен $h_{1пр}$ і $h_{2пр}$ і звести завдання до відомого випадку поширення радіохвиль над фіктивною площиною, що э дотичною до поверхні Землі в точці відбиття.

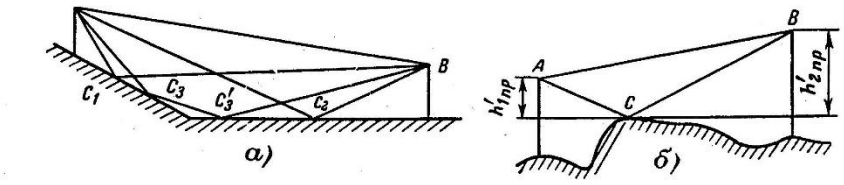


Рис. 3.1 Поширення УКХ в перетнутої місцевості

а – антена на пологому схилі; *б* – полога височина в середині траси

Траса, що проходить над високим пагорбом або гірським кряжем. Для наближеного визначення напруженості поля на трасі, що має високий пагорб або гірський кряж, можна скористатися теорією дифракції електромагнітних хвиль на непрозорому клиноподібному екрані. Якщо перешкода не перекриває лінії прямої видимості між антенами, то траса називається відкритою; коли перешкода піднімається вище за лінію прямої видимості, траса називається закритою (рис. 3.2,а).

Якщо перешкода хоч би частково перекриває першу зону Френзеля, інтенсивність електромагнітного поля на трасі змінюється. При застосуванні гостро направлених антен випромінювані хвилі не потрапляють на рівні ділянки земної поверхні і напруженість поля за перешкодою визначається формулою

$$E_m = E_{m.в}\, V,$$

де $E_{m.в}$ знаходиться з виразу (1.1).

Множник ослаблення V залежить від довжини хвилі та «просвіту» *d*, який прийнято вважати позитивним при закритій трасі та негативним при відкритій трасі. На рис. 3.2,б зображено залежність множника ослаблення V від параметра z:

$$z = d\sqrt{\frac{2(r_a + r_b)}{r_a r_b \lambda}}$$

Величини r_a, r_b, *d* показані на рис. 3.2,а.

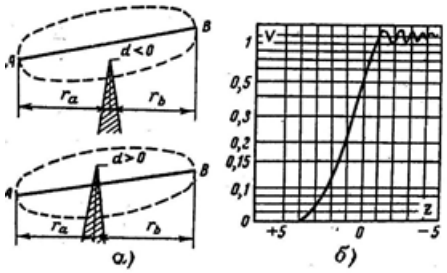


Рис. 3.2 Поширення УКХ на трасі з перешкодою

а) відкрита та закрита траси; б) залежність множника ослаблення *V* від параметра *z*

На трасах УКХ протяжністю приблизно 100-150 км, що проходять через гірські кряжі висотою 1000-2000 м, спостерігається явище, що має назву посилення

перешкодою. Це полягає в тому, що інтенсивність електромагнітного поля радіохвилі при деякому віддалені за перешкоду виявляється більше, ніж на тій самій відстані від передавача на трасі без перешкод. Пояснити посилення перешкодою можна тим, що вершина гори є природним пасивним ретранслятором (рис. 3.3). Поле, що збуджує вершину гори, складається з двох хвиль - прямої АС та відбитої ADC. Хвилі дифрагують на гострій вершині гори, як у клиноподібної перешкоді, і поширюються у область за гору. При цьому до місця розташування приймальної антени прийдуть два промені СЕВ і СВ. На ділянках траси передавач - гора і гора - приймач поширення йде в межах прямої видимості.

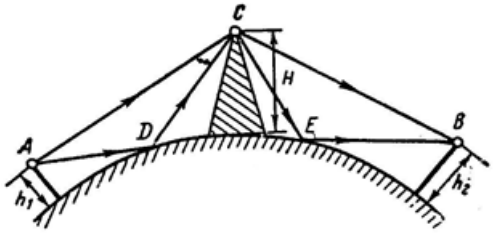


Рис. 3.3 Схема траси з «перешкодою, що підсилює»

За відсутності перешкоди на відстані 100—150 км, що набагато перевищує межу прямої видимості, до місця прийому доходить лише дуже слабке поле, обумовлене дифракцією на сферичній поверхні Землі та рефракцією. Розрахунки та експерименти показують, що така перешкода - ретранслятор може дати підсилення напруженості електричного поля на 60-80 дБ.

Використання явища підсилення перешкодою виявляється економічно вигідним, позбавляючи необхідності встановлювати високогірні ретрансляційні станції.

На деяких радіорелейних лініях, що проходять в рівнинній місцевості, споруджується штучна посилююча перешкода у вигляді сітки або системи проводів, що дає виграш у потужності і дозволяє зменшити висоту антенних щогл.

Велике місто можна розглядати як сильно пересічену місцевість. Численні досліди показали, що у середньому напруженість поля метрових і дециметрових хвиль

у місті менше, ніж відкритої місцевості, приблизно 3—5 раз. Тому грубу оцінку середнього рівня напруженості поля на цих хвилях можна проводити (2.14), вводячи в неї множник 0,2-0,4. У сантиметровому діапазоні хвиль ослаблення ще сильніше.

Якщо є пряма видимість між передавальною та приймальною антенами, то розрахунок можна вести по (2.14), причому висоту розташування антени слід відраховувати від середнього рівня дахів.

Усередині приміщень структура поля є ще складнішою і майже не піддається розрахунку. Вимірювання напруженості поля всередині приміщення показали, що у приміщеннях верхніх поверхів напруженість поля становить 10—40% напруженості поля над дахом, а першому поверсі 3— 7% цієї величини.

3.4 Поширення УКХ на великі відстані в умовах над рефракції

При відстанях, що перевищують відстань прямої видимості, напруженість поля радіохвиль різко зменшується. На цих відстанях поширення відбувається внаслідок дифракції радіохвиль навколо сферичної поверхні Землі, рефракції радіохвиль у тропосфері та розсіювання їх на неоднорідностях тропосфери.

Різке збільшення дальності поширення УКХ відбувається, коли область над рефракції займає значні відстані над земною поверхнею. У цьому випадку радіохвиля поширюється шляхом послідовного чергування двох явищ: рефракції в атмосфері та відбиття від земної поверхні. Такий вид поширення хвиль отримав назву атмосферного хвилеводу. Але при цьому від атмосфери відбивається тільки частина енергії хвилі, яка використовується для прийому, а решта, заломлюючись, йде через верхню стінку хвилеводу (рис. 3.4). Для атмосферного хвилеводу певної висоти за аналогією з металевим хвилеводом є деяка критична довжина хвилі. Хвилі довші за критичну швидко згасають і не поширюються. Критична довжина хвилі $\lambda_{кр}$ (м), пов'язана з висотою хвилеводу $h_в$ (м), співвідношенням:

$$\lambda_{кр} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot h_в^{\frac{3}{2}}.$$

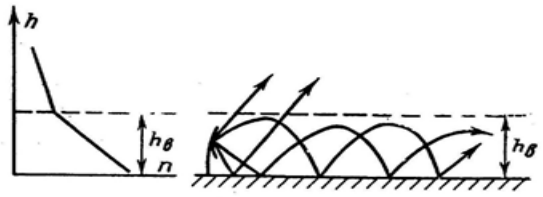


Рис. 3.4 Поширення УКХ в умовах атмосферного хвилеводу

Висота атмосферних хвилеводів $h_в$ сягає кілька десятків метрів, хвилеводне поширення можливе лише сантиметрових і дециметрових хвиль. У разі хвилеводного каналу лише найбільш пологі промені відбиваються від стінок каналу, а крутіші промені просочуються крізь стінки. Якщо передавач і приймач перебувають у межах хвилеводу, то прийом УКХ виявляється можливим на великих відстанях. В іншому випадку дальність прийому може навіть зменшитися порівняно з умовами нормальної рефракції.

Атмосферні хвилеводи виникають нерегулярно, тому забезпечити стійкій радіозв'язок на великих відстанях на хвилеводному поширенні УКХ не можна. Це явище може спричинити перешкоди між станціями, які працюють у сантиметровому діапазоні хвиль і навіть рознесені на великі відстані. Поява атмосферного хвилеводу може створювати перешкоди для роботи радіолокаційних станцій виявлення літаків. Наприклад, літак, що знаходиться вище атмосферного хвилеводу, може бути не виявлений через те, що радіохвилі відіб'ються від стінки хвилеводу.

3.5 Розсіювання УКХ на неоднорідностях тропосфери

Неоднорідності тропосфери є області, в яких діелектрична проникність відрізняється від середнього значення для навколишньої тропосфери. Під дією поля хвилі, що проходить, у кожної неоднорідності тропосфери наводяться струми поляризації і створюється електричний момент. Внаслідок цього неоднорідності діють як вторинні випромінювачі. Вторинне випромінювання сукупності неоднорідностей можна характеризувати деякою діаграмою спрямованості з

максимумом випромінювання у бік початкового руху хвилі.

Поле, що створене поблизу земної поверхні, є результатом інтерференції полів, що пере випромінюються великою кількістю неоднорідностей. Внаслідок зміни структури та розташування неоднорідностей поле безперервно флуктує і є випадковою функцією часу. Характер розподілу миттєвих значень рівня сигналу залежить від середнього рівня сигналу. Чим рівень менше, тим ближче закон розподілу до релеївського. При більших рівнях сигналу миттєві значення його амплітуди розподілені за узагальненим законом Релея. Це свідчить про наявність у місці прийому крім компоненти сигналу, що швидко змінюється, регулярної компоненти, що змінюється повільно. Ця компонента отримана шляхом відбиття від шаруватих неоднорідностей тропосфери.

Роботу лінії зв'язку, що використовує розсіювання радіохвиль на неоднорідностях тропосфери, можна пояснити наступним чином. В результаті перетину в просторі діаграм спрямованості передавальної та приймальної антен, умовно обмежених прямими AD-AC_1 і BD-BC (рис. 3.5), утворюється об'єм атмосфери CDC_1D_1, якій має назву об'єм, що розсіює. Він і бере участь у передачі радіохвиль від пункту А до пункту В. Для збільшення напруженості електричного поля в місці прийому прагнуть зменшити кут між напрямком початкового руху хвилі і направленням в точку прийому (кут θ на рис. 3.5).

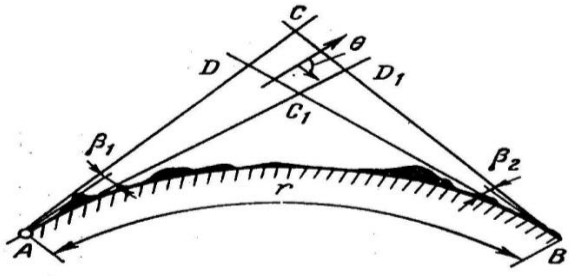


Рис. 3.5 Схема лінії радіозв’язку, яка використовує тропосферне розсіяння

Характерною особливістю розглянутих ліній зв'язку є вузька смуга частот. Максимальна смуга частот, яка передається без спотворень, визначається часом

запізнення променю АСВ щодо променю AC_1B, тобто шириною діаграм спрямованості. Практично можна передати смугу частот 1-2 МГц.

Для боротьби із завмираннями прийом проводиться на рознесені (дві чи чотири) антени. Сигнали, що прийняті цими антенами, складаються після детектування. Використовується також рознесення по частоті, коли та сама інформація одночасно передається на частоті f_1 і частоті $f_2 = f_1 + \Delta f$, причому $\Delta f / f_1 = (2 - 5)\ 10^{-3}$. Завмирання цих двох частотах не корельовані. Проводиться прийом або найсильнішого із двох сигналів, або сигнали складаються після детектування.

3.6 Розсіювання та відбиття метрових хвиль в іоносфері

Іонізовані шари характеризуються великою неоднорідністю. Наявність місцевих об'ємних неоднорідностей іоносфери призводить до розсіювання УКХ, яке відбувається аналогічно розсіювання на неоднорідностях тропосфери.

Розсіювання радіохвиль відбувається на висоті 70-90 км, що обмежує максимальну протяжність лінії радіозв'язку відстанню в 2000-2300 км. Основна частина енергії хвилі, що падає на іоносферу, розсіюється в напрямку початкового руху хвилі. Чим більший кут, що складається напрямом на приймальну антену з напрямком початкового руху хвилі, тим менше рівень потужності розсіяного сигналу. Тому прийом можливий лише з відстанях понад 800—1000 км. Напруженість поля розсіяного сигналу зменшується з підвищенням робочої частоти, тому для зв'язку застосовуються хвилі частотою 30—60 МГц. Сигнали при такому зв'язку на метрових хвилях схильні до швидких і глибоких завмирань. Для боротьби із завмиранням застосовується прийом на дві антени.

Перевагами радіозв'язку шляхом іоносферного розсіювання метрових хвиль порівняно з лініями зв'язку на КВ є можливість цілодобової роботи на одній робочій частоті без порушень зв'язку, досягається велика надійність радіотелеграфного зв'язку в приполярних областях. Але такий зв'язок вимагає застосування передавачів потужністю близько 10 кВт і антен з коефіцієнтом підсилення 20-30 дБ.

4 ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ РАДІОРЕЛЕЙНОЇ ЛІНІЇ

4.1 Моделювання ліній та визначення якісних показників зв'язку

Показники якості та готовності для різних НВЧ систем тісно пов'язані з характеристиками мереж зв'язку. Ці характеристики рекомендовані МСЕ-Р та МСЕ-Т. Для проектування систем зі швидкістю передачі STM - 1 і вище використовується рекомендація G.826 МСЕ-Т [8, 9]. У Рекомендаціях МСЄ-Т визначаються моделі цифрової мережі як сукупність гіпотетичних об'єктів певної довжини та складу.

Для полегшення дослідження погіршень цифрової передачі (наприклад, помилки в бітах, тремтіння та дрейф фази, прослизання, час передачі) модель мережі повинна включати з'єднання різних типів елементів передачі (наприклад, системи передачі, мультиплексори, демультиплексори, цифрові тракти, транскодери). Така модель визначається як гіпотетична еталонна цифрова лінія (ГЕЦЛ).

У Рекомендаціях МСЕ-Р використовується термін гіпотетичний стандартний цифровий тракт (ГЕЦТ). Його довжина приймається рівною 2500 км. Гіпотетичний еталонний цифровий тракт довжиною 2500 км для радіорелейних систем складається з дев'яти радіо ділянок, кожна із яких має довжину приблизно 280 км.

Для того щоб при розрахунках на основі моделі могли бути використані якісні параметри, які взяті безпосередньо з технічних описів систем передачі, у складі моделі використовується поняття гіпотетична еталонна цифрова ділянка (ГЕЦД). Вхідний та вихідний порти зазначеної ділянки - рекомендовані інтерфейси відповідними Рекомендаціями для різних швидкостей цифрової ієрархії. Довжина ділянок обрана типовою для цифрових ділянок, що зустрічаються в реальних мережах, і є достатньо великою, щоб відповідати реальним показникам якості цифрових радіосистем. Модель є однорідною, тобто вона не включає іншого цифрового обладнання, такого як мультиплексори та демультиплексори. Це дозволяє їй бути основою побудови гіпотетичного еталонного цифрового тракту (ГЭЦТ). У Рекомендації G.921 МСЕ-Т для ГЕЦТ передбачені довжини 50 та 280 км.

4.2 Характеристики якості

До характеристик якості відносяться характеристики готовності та показники якості з помилок. Моделі ГЕЦТ і ГЭЦД є основою визначення параметрів якості з помилок і готовності [8, 9].

Характеристики готовності для ГЕЦТ встановлені у рекомендації 557 МСЕ-Р. ГЕЦТ вважається не готовим, якщо протягом 10 послідовних секунд виникли такі умови або одна з них: передача цифрового сигналу перервана; у кожній секунді BER гірше 10^{-3}. Неготовність апаратури ущільнення виключається. Характеристики неготовності поділяються на неготовність обладнання та неготовність, викликану умовами поширення радіохвиль. Розмір цих частин визначається адміністраціями чи проектувальниками ліній, але більшість адміністрацій прийняло величину неготовності, викликану дощем, між 30% - 50%.

Показником якості за помилками для міжнародного цифрового з'єднання призначено Рекомендацію G.821 МСЕ-Т. У ній визначаються параметри і норми для показників якості за помилками для каналу 64 кбіт/с, а у Додатку D міститься спеціальна процедура перерахунку норм для випадку, якщо вимірювання проводяться на швидкості передачі В кбіт/с в системі. Показники якості за помилками мають оцінюватися лише тоді, коли з'єднання перебуває у стані готовності.

Параметри показників якості за помилками визначаються на основі таких подій:

- секунда з помилками (ES): період в 1 секунду, протягом якого спостерігаються помилки в одному або декількох бітах;

- секунда, уражена помилками (SES): період у 1 секунду, протягом якого коефіцієнт помилок по бітах $1 \cdot 10^{-3}$.

Параметрами є:

- коефіцієнт секунд з помилками (ESR): відношення числа ES до загального числа секунд у період готовності протягом фіксованого інтервалу вимірювань;

- коефіцієнт секунд, уражених помилками (SESR): відношення числа SES до загального числа секунд у період готовності протягом фіксованого інтервалу

вимірювань;

У таблиці 4.1 наведено показники якості за помилками для міжнародного з'єднання мережі та її ділянок відповідно до Рекомендації G.821 МСЕ-Т, Рекомендацій F.594, F.634 та F.696 МСЕ Р.

До міжнародних трактів з постійною швидкістю передачі бітів, що дорівнює або перевищує первинну швидкість, застосовується рекомендація G.826 МСЕ-Т [9]. Ці тракти можуть знайти застосування в плезіохронної цифрової ієрархії, синхронної цифрової ієрархії або бути частиною будь-якої іншої мережі, наприклад, мобільної. Рекомендація є загальною в тому сенсі, що визначає параметри і норми трактів незалежно від типу мережі, частиною якої ці тракти є. Якщо з'єднання 64 кбіт/с задовольняє вимогам цієї Рекомендації, то можна бути впевненим у тому, що вона в більшості випадків буде задовольняти вимогам, які містяться в Рекомендації G.821 МСЕ-Т. Таким чином, Рекомендація G.826 є єдиною Рекомендацією, необхідною для розрахунків показників якості за помилками при проектуванні мереж з первинною швидкістю передачі або вище.

Таблиця 4.1

Показники якості помилок для міжнародного з'єднання мережі та її ділянок

Тип ділянки	Показники якості у відповідності з Рек. G.821		Показники якості для ЦРРС	
	ESR	SESR	ESR	SESR
Загальна якість (значення коефіцієнта, середнє по блоках)	0,012	0,00015	0,012 F.697 МСЕ-Р	0,00015 F.697 МСЕ-Р
Середня якість (значення коефіцієнта, середнє по блоках)	0,012	0,00015	0,012 F.696 МСЕ-Р	0,0004 F.696 МСЕ-Р
Висока якість 25 000 км, 2500км	0,032 0,0032	0,0004 0,00004	0,0032 Рек. F.594, F.634 МСЕ-Р	0,00054 Рек. F.594, F.634 МСЕ-Р
Міжнародне з'єднання мережі 27 500 км	<0,08	< 0,002 (0,001+0,001)		

Примітка 1. До значень SESR для ділянок середньої та високої якості додається поправна величина 0,001 для обліку несприятливих умов поширення сигналу в

мережі, що виникають час від часу (мається на увазі гірший місяць року). Через випадковий характер ефектів, які виникають у гірший місяць року в з'єднаннях, які можуть перебувати в будь-якій точці земної кулі, було прийнято наступний розподіл загальної поправної величини SESR 0,001:

0,0005 SESR для ГЕЦТ довжиною 2500 км радіорелейних систем під час використання у поєднанні на ділянці високої якості;

0,0005 SESR для ГЕЦТ довжиною 2500 км радіорелейних систем під час використання у поєднанні на ділянці середньої якості.

Рекомендація G.826 МСЕ-Т складена на основі вимірювання показників якості помилок у блоках. Блоком називається набір послідовно переданих по даному каналу бітів; кожен біт належить одному і лише одному блоку. Послідовність бітів може бути безперервної у часі.

У Рекомендації G.826 МСЕ-Т зазначаються норми на показники якості та готовності, які наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Норми на показники якості та готовності відповідно до рекомендації G.826

Ділянка	Довжина тракту, км	Показник SESR, %	Коефіцієнт неготовності $K_{НГ}$, %	Розподіл частки SESR та $K_{нг}$ для реальних ліній зв'язку; L, км
Міжнародна	12500	0.06	1.5	Пропорційне L для L≥2500
Магістральна	2500	0.012	0.3	Пропорційне L для L≥50
Внутрішньо зонова	600	0.012	0.05	Пропорційне L для L≥600 Незалежно від L для 200<L<6000
	200	0.012	0.05	Пропорційне L для 50<L<200
	50	0.003	0.0125	Незалежно від L для L<50
Місцева	100	0.01	0.05	Незалежно від L для L<100
Мережа доступу	-	0.015	0.05	Незалежно від L

Таким чином, в нашому випадку коефіцієнт неготовності $К_{нг}$ та кількість вражених секунд будемо розраховувати, використовуючи норми з таблиці 4.2.

4.3 Методи покращення надійності зв'язку

Розрахунок будь-якої радіорелейної лінії насамперед зводиться до вибору траси та місця розташування станцій мережі [10]. Проект з побудови РРЛ має на увазі конкретні розташування станцій, у нашому випадку всі радіорелейні станції розташовуються в невеликих містах на Заході України. Таке розташування, по-перше, дозволяє покращити зв'язок, а по-друге, полегшує обслуговування та забезпечення електроживленням. Все зовнішнє обладнання розташовується або на існуючих антенних вежах та опорах, або на проектованих.

Внутрішнє обладнання розташовується у будинках. Усе мультиплексорне обладнання та внутрішнє обладнання радіорелейного зв'язку, а також джерела живлення встановлюються в проектованих 19 дюймових шафах зв'язку. Загальна довжина ЦРРЛ складає 68 км. Середня довжина інтервалу – 34 км. Нумерація радіорелейних станцій ведеться від міста Коломия до міста Борщів.

У разі перевищення нормативних значень на якісні параметри зв'язку РРЛ приймають наступні рішення [3, 7]:

- підйом антен станцій на велику висоту, що пов'язано з низкою труднощів (обмеженістю висоти самої вежі, можливою складною електромагнітною обстановкою з обладнанням, що вже є);

- вибір іншого місця розташування радіорелейної станції;

- застосування іншого обладнання (більш чутливий приймач, більш потужний передавач, антени з великим діаметром дзеркала);

- застосування прийому рознесення, який буває двох видів - просторовий і частотний (рис. 4.1), також може використовуватися комбінація цих методів; частотний метод у термінології радіорелейного зв'язку найбільш відомий як метод вибору "систем резервування"; відомо кілька систем резервування, але не все радіорелейне обладнання підтримує всі з них, таким чином завдання полягає і у виборі найбільш оптимального з цих способів для застосування в цьому випадку.

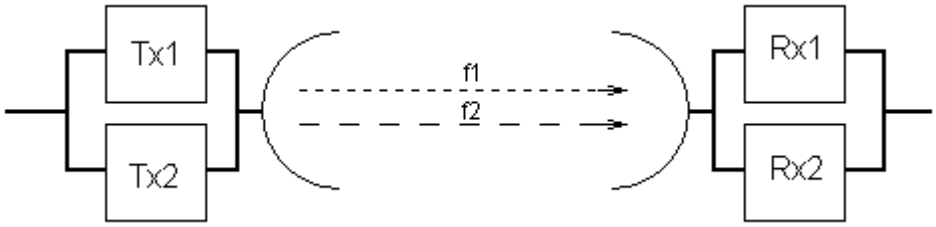


Рис. 4.1 Принцип частотного розділення каналів

Для роботи за різних умов експлуатації та навколишнього середовища все активне обладнання може бути використане в одному з режимів:

- 1+0 – передача радіосигналу без резервування;

- 1+1 гарячий резерв - передача радіосигналу з повним резервуванням обладнання;

- 1+1 резервування лінії - передача STM-1 потоку через основний та резервний радіоканал, використовуючи два номінали частот за допомогою однієї антени.

Режим "гарячого резервування" 1+1 є резервування обладнання, при якому передається один STM-1 потік з використанням одного радіочастотного каналу. При виходу з ладу обладнання система автоматично перемикається на резервний комплект. При цьому час перемикання настільки малий, що такий провал сигналу не перевищує норм за якісними показниками радіорелейної лінії, а на практиці становить менше 10 нс. При гарячому резервуванні потрібна наявність двох комплектів ППП, що працюють на одну антену. Існують ще два режими резервування "теплий" та "холодний", їхня основна відмінність від "гарячого" полягає в часі перемикання на резервний канал. При цьому при "холодному" і "теплому" резервуванні можна працювати на тій же частоті, що і основний канал. Як правило, останнім часом виробники сучасного радіорелейного обладнання намагаються використовувати лише "гарячий" режим, і лише в окремих випадках - "теплий". У деяких випадках забезпечують постійну передачу однієї й тієї інформації з двох незалежних каналів, при цьому кожен канал має свій ППП і свою антену. Пристрій на прийомі порівнює сигнали, які надходять на вхід приймачів, і, залежно від рівня сигналу, вибирає

найкращий. Такий спосіб дозволяє звести втрату інформації у зв'язку із завмираннями сигналу в атмосфері до нуля, але за це потрібно платити як більшим зайнятим частотним ресурсом, так і більшою вартістю обладнання.

4.4 Методика розрахунку показників якості

Траса ЦРРЛ, що проектується, знаходиться в кліматичній зоні Західної України. Для цього регіону характерним є досить високий рівень опадів: величина інтенсивності дощів становить 70 мм/год [11].

Параметром апаратури цифрових РРЛ, що характеризує стійкість до перешкод, є граничний рівень сигналу на вході приймача $P_{пр}$, при якому забезпечується максимальна нормована величина коефіцієнта помилок $P_{пом,макс}$ (BER).

Для розрахунку статистики глибини порівняно повільних рефракційних замирань ζ та з урахуванням нелінійної зміни діелектричної проникності повітря з висотою, вводиться поняття ефективного вертикального градієнта діелектричної проникності повітря $g = \partial\varepsilon/\partial h$. Під величиною g розуміють постійний за висотою градієнт, при якому напруженість поля в точці прийому буде такою самою, як і у разі реальної зміни на трасі. Кліматичний район проектування ЦРРЛ характеризується середнім значенням градієнта діелектричної проникності повітря $g = -10*10^{-8}$ 1/м та дисперсією діелектричної проникності повітря $\sigma = 9*10^{-8}$ 1/м. Робоча частота апаратури становить 7,4 ГГц.

Показниками якості обрано коефіцієнт неготовності та коефіцієнт секунд зі значною кількістю помилок.

Коефіцієнт неготовності складається з наступних величин:

$$К_{нг} = P_м + P_д + P_{об} \quad (4.1)$$

де $P_м$ – загальна ймовірність порушення радіозв’язку, яка викликана багатопроменевим завмиранням;

$P_д$ - ймовірність порушення радіозв’язку, яка викликана дощем;

$P_{об}$ - ймовірність порушення радіозв'язку, яка викликана відмовою обладнання.

4.4.1 Необхідний запас на завмирання

Атмосферні збурення впливають на умови передачі радіорелейними лініями прямої видимості. Рівень прийнятого сигналу змінюється в часі і характеристики системи визначаються ймовірністю того, чи рівень сигналу впаде нижче граничного значення, чи буде спектр прийнятого сигналу сильно спотворений [12, 13].

Розглянемо спрощену структурну схему ділянки радіолінії та відповідну діаграму рівнів сигналу (рис. 4.2). Якість роботи лінії зв'язку визначається рівнем сигналу на вході приймача $P_{пр}$ і можливими відхиленнями цього рівня при завмираннях. На діаграмі рівнів видно, що сигнал випромінюється передавачем з рівнем $P_{пер}$, проходить через фільтр, який розв'язує передавач і антену (РФ), в якому рівень падає за рахунок внутрішніх втрат, і надходить через лінію фідера в передаючу антену з коефіцієнтом підсилення G_1. За рахунок втрат у фідерній лінії $L_{ф1}$ рівень сигналу ще зменшується, а в антені, що передає, збільшується на величину G_1. При поширенні сигналу по ділянках РРЛ (довжиною R_0, на робочій частоті f) рівень сигналу падає за рахунок ослаблення у вільному просторі, втрат у газах атмосфери та деяких додаткових втрат. Загальне послаблення сигналу за рахунок цих причин може досягти 130-140 дБ і більше.

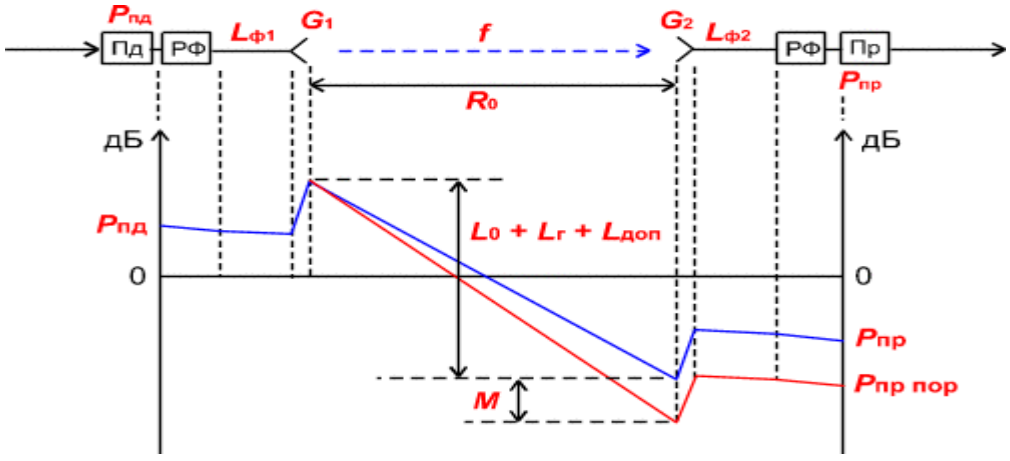


Рис. 4.2 Діаграма рівнів сигналу на інтервалі РРЛ

У приймаючій антені рівень сигналу збільшиться на величину G_2, потім зменшиться в фідері лінії, що приймає, у фільтрі, який розділяє, і надійде на вхід приймача з рівнем $P_{пр}$. Це значення буде на прийомі у відсутності завмирань сигналу на прольоті РРЛ.

Запас на завмирання М є різницею між рівнем сигналу на вході приймача $P_{пр}$ та його граничним значенням $P_{гр}$, що визначається з параметрів конкретної цифрової апаратури РРЛ для заданої величини $К_{пом}$ (10^{-3} або 10^{-6}).

Рівень сигналу на вході приймача можна визначити за формулою:

$$P_{пр} = P_{пер} + G_1 + G_2 – L_0 – L_{ф1} – L_{ф2} – L_г – L_{рф} – L_{дод} \quad (4.2)$$

де $P_{пер}$ - рівень потужності передавача, дБм;

G_1, G_2 - коефіцієнти підсилення передаючої та приймальної антен;

$L_{ф1}$, $L_{ф2}$ - ослаблення сигналу в фідерних лініях ($Ф_1$, $Ф_2$), дБ.

За відсутності фідеру (коли приймачі об'єднані з антеною у вигляді моноблока) необхідно враховувати конструктивні особливості пристрою об'єднання. У цих випадках втрати у фідерах можна прийняти рівними 0 дБ. При великих діаметрах антен з'єднання проводиться коротким відрізком гнучкого хвилеводу, втрати в якому $L_{ф1} = L_{ф2} = 0{,}5$ дБ; $L_{рф}$ - визначається з параметрів апаратури. Звичайне значення ослаблення у фільтрах, які поділяють, відповідає сумі втрат у передавальному та приймальному пристроях. При моноблочній конструкції дані про рівень потужності передавача та граничні значення рівня сигналу на вході приймача, часто відносяться до точок, які відповідають рівням на антенному хвилеводному з'єднувачі (іншими словами, значення рівнів вже закладені у втрати в фільтрах, які поділяють). У цих випадках величина втрат $L_{рф} = 0$. При рознесеній конструкції приймачів і антен, втрати в РФ становлять 4 - 5 дБ залежно від типу та довжини фідера.

$L_{дод}$ – додаткові втрати, які складаються з втрат в антенних обтічниках та втрат від перепаду висот приймальної та передавальної антен $L_{дод} = 1 \div 2$ дБ;

L_0 - ослаблення радіохвиль при поширенні у вільному просторі, розраховується за формулою:

$$L_0 = 20 \lg(4{,}198*104\ R_0\ f),\ \text{дБ} \qquad (4.3)$$

де R_0 - довжина ділянки РРЛ, км;

f - робоча частота, ГГц.

$L_г$ – атмосферні втрати (в газах), які розраховуються за формулою:

$$L_г = (\gamma_0 + \gamma_н)\ R_0 = \gamma_{сум}\ R_0 \qquad (4.4)$$

де γ_0, $\gamma_н$ - погонні загасання в водяних парах та атомах кисню атмосфери.

4.4.2 Атмосферні втрати

Атмосферні втрати, в основному, складаються з втрат в атомах кисню та молекулах води. Практично повна непрозорість атмосфери для радіохвиль спостерігається на частоті 118.74 ГГц (резонансне поглинання в атомах кисню), а частотах більше 60 ГГц погонне згасання перевищує 15 дБ/км. Ослаблення у водяних парах атмосфери залежить від їхньої концентрації і є дуже великим у вологому теплому кліматі та домінує на частотах нижче 45 ГГц [14].

Погонні втрати в атомах кисню розраховуються за формулою (дБ/км):

$$\gamma_0 = \left[7.19\cdot10^{-3} + \frac{6.09}{f^2+0.227} + \frac{4.81}{(f-57)^2+1.5}\right]\cdot f^2\cdot10^{-3}\ \text{, дБ/км,} \qquad (4.5)$$

де f - робоча частота, ГГц.

Ця формула є вірною для робочих частот нижче за 57 ГГц, при нормальному атмосферному тиску та при температурі повітря +15 градусів С.

Погонні втрати в водяних парах розраховуються за формулою:

$$\gamma_H = \left[0.05 + 0.0021\cdot\rho + \frac{3.6}{(f-22.2)^2+8.5} + \frac{10.6}{(f-183.3)^2+9} + \frac{8.9}{(f-325.4)^2+26.3}\right]\cdot f^2\cdot\rho\cdot10^{-4}\ \text{, дБ/км,} \qquad (4.6)$$

де ρ - концентрація водяних парів в атмосфері, г/м^3 (звичайне ρ = 7,5 г/м^3).

Сумарні погонні втрати (дБ/км) при температурі, яка відрізняється від 15^{0}С, можна обчислити за наступною формулою:

$$\gamma_{СУМ} = \left[1-(t-15)\cdot0.01\right]\cdot\gamma_0 + \left[1-(t-15)\cdot0.06\right]\cdot\gamma_H, \qquad (4.7)$$

де t - температура повітря (t)в градусах С.

Таким чином, розрахунок запасу на завмирання можна провести за формулою:

$$M = P_{пр} - P_{пр,\ пор}, \quad (4.8)$$

де $P_{пр,\ пор}$ - мінімальне-допустимий (пороговий) рівень потужності сигналу на вході приймача-передавача (чутливість).

4.4.3 Можливість порушення зв'язку через інтерференцію радіо променів

Метеорологічні умови у просторі, які відділяють передавач та приймач, можуть іноді впливати на прийнятий сигнал. Промені, які зазвичай загасають у тропосфері, можуть заломлюватися і потрапляти у приймальну антену та у приймач, де вони додаються до корисного сигналу. Амплітудно-фазові співвідношення між цими сигналами визначають результуючий сигнал на виході приймача.

При цьому виникають два ефекти, що впливають на якість передачі сигналів. В одних випадках усі компоненти корисного сигналу зменшуються однаковою мірою. Це так звані "плоскі" завмирання [12]. В інших випадках пригнічуються лише деякі компоненти спектру, що викликає його перекручування. Це так звані "селективні" завмирання. Ці два ефекти виявляються окремо. Для розрахунку плоских замирань застосовується метод, що базується на результатах безлічі вимірювань, проведених у різних частинах світу. Ці вимірювання показали, що ймовірність зниження рівня прийнятого сигналу на М дБ порівняно з рівнем сигналу у вільному просторі (ймовірність порушення зв'язку) може бути обчислена за наступною формулою [12]:

$$P_{ПЛОСК} = P_0 \cdot 10^{-M/10}, \%, \quad (4.9)$$

де M - запас на завмирання, дБ;

P_o - ймовірність появи завмирання (у %), яка визначається за формулою:

$$P_0 = K \cdot R_0^{3.6} \cdot f_B^{0.89} \cdot (1+|E_h|)^{-1.4}, \% \quad (4.10)$$

де E_h - нахил інтервалу (мілірадіан):

$$E_h = (h_1 - h_2)/R_0, \text{ мрд} \quad (4.11)$$

де h_1 та h_2 - абсолютні висоти підвісу антен, м;

K – гео-кліматичний коефіцієнт, що можна оцінити за даними завмирання для середнього найгіршого місяця.

При відсутності таких даних можна використати наступне емпіричне співвідношення для сухопутних трас:

$$K = 10^{-5.1} \cdot P_L^{1.5} \cdot M \,, \tag{4.12}$$

де P_L - процент часу, на протязі якого середній коефіцієнт заломлення в самих нижніх 100 м атмосфери не перевищує певної границі. Для середніх широт P_L = 5, M=$10^{-0,2}$. Коефіцієнт M використовується при сильно ізрізаних профілях пролетів, коли немає сенсу визначати середнє значення кута дотику. У нашому випадку для більш менш рівнинної місцевості M=1.

Селективні завмирання можуть значно погіршити характеристики радіорелейних ліній прямої видимості через амплітудні та фазові спотворення в смузі сигналу. Ці багатопроменеві (селективні) завмирання можуть з'явитися в результаті відбивання від поверхні або аномалій в атмосфері, наприклад великого градієнта в атмосферному хвилеводі (рис. 4.3).

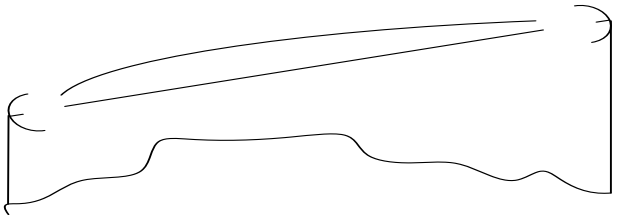


Рис. 4.3 Спрощена двопроменева модель селективних завмирань

Вплив селективного завмирання на цифрову радіорелейну лінію можна коротко описати наступним чином [12]:

- зменшується відношення сигнал/шум та збільшується ймовірність помилки (BER);

- спотворюється форма імпульсу, збільшуючи між символьну інтерференцію та ймовірність помилки;

- збільшуються взаємні перешкоди між ортогональними несучими потоками Q

і збільшується BER.

Існує ціла низка різних методів для прогнозу порушень зв'язку, викликаних селективними завмираннями. У рекомендації [13] описано метод сигнатур. Цей метод досить добре узгоджується з результатами вимірювань і ясно показує здатність радіоапаратури протистояти селективним завмиранням.

Імовірність появи селективного завмирання дорівнює:

$$P_{СЕЛ} = 4.3 \cdot 10^{-1} \cdot \eta \cdot sf \cdot \frac{\tau_m^2}{\tau_0}, \quad (4.13)$$

де Δf = 1,8*10^{-3} - коефіцієнт сигнатури обладнання;

τ_m - типове значення затримки відбитого сигналу на ділянці (нс), визначається за формулою:

$$\tau_m = 0{,}7*(R_0/50)^{1,5},$$

τ_0 – час затримки відбитого сигналу в час вимірювання кривих сигнатури;

τ_0 = 6,3 нс;

η - коефіцієнт активності завмирання, знаходиться за формулою:

$$\eta = 1 - \exp(-0.2 \cdot \left(\frac{P_0}{100}\right)^{\frac{3}{4}}). \quad (4.14)$$

Загальна ймовірність порушення радіозв'язку, що викликана багатопроменевим завмиранням, дорівнює сумі ймовірностей порушень, викликаних плоским і селективним завмиранням:

$$P_{сум} = P_{пл} + P_{сел}, \%. \quad (4.15)$$

Спрощено розрахунок параметру SESR можна провести за формулою:

$$SESR = \left\{\frac{K_{інт}-1}{\varphi_{інт}} + 1\right\} T_{інт}\varphi_{інт} + T_0, \quad (4.16)$$

де $T_{інт}$ – відсоток часу, протягом якого величина коефіцієнта помилок на виході ЦРРЛ перевищує максимально допустимий коефіцієнт помилок через багатопроменеві (інтерференційні) завмирання на інтервалі;

T_0 - відсоток часу, протягом якого величина коефіцієнта помилок на виході

цифрової РРЛ перевищує максимально допустимий коефіцієнт помилок через субрефракційні завмирання, що відбуваються через вплив екрануючих перешкод при субрефракції;

$K_{інт}$ - коефіцієнт інтерференції (звичайне $K_{інт}$ =1);

$\varphi_{інт}$ - коефіцієнт готовності в умовах інтерференційних завмирань;

$\varphi_{\tau 0}$ - коефіцієнт готовності в умовах субрефракційних завмирань.

4.4.4 Ймовірність порушення зв'язку, спричинена дощем

Передача НВЧ сигналу піддається впливу опадів. Дощ, сніг, частинки льоду та град послаблюють та розсіюють НВЧ сигнал, який визначає готовність системи з точки зору якості передачі. Енергія послаблюється через пере випромінювання (розсіювання) та поглинання (нагрівання). Завдяки тому, що радіохвилі є змінним у часі електромагнітним полем, вони створюють у дощовій краплі дипольний момент. Диполь дощової краплі змінюється в часі так само, як і радіохвиля і тому діє як антена, що пере випромінює енергію. Дощова крапля є антеною з дуже невеликою спрямованістю і деяка частина енергії пере випромінюється по різних напрямках, що призводить до втрат енергії. Коли довжина хвилі менша за розмір дощових крапель, більша частина енергії йде на нагрівання крапель. Напруженість поля радіохвилі сильно змінюється через створення дипольного моменту.

Збільшення дощових крапель призводить до зміни їх форми, вони набувають форму, яка відрізняється від сферичної. Це відхилення від сферичної форми викликає їхнє розтягування в горизонтальному напрямку. Краплі послаблюють горизонтально поляризовану хвилю більше, ніж вертикально поляризовану. Це означає, що вертикальна поляризація є більш прийнятною на високих частотах, де домінують відмови в роботі радіолінії, що викликані дощем.

Оскільки дощ має тенденцію йти зарядами (особливо дощі з високою швидкістю), лише частина прольоту радіолінії потрапить під вплив дощу. Ефективна довжина прольоту, що містить дощові заряди, визначається виразом [14]:

$$\psi = \frac{R_0}{1 + \frac{R_0}{35 \cdot \exp(-0.015 \cdot I)}} \text{ км}, \quad (4.17)$$

де I = 70 мм/г - інтенсивність дощу (значення, що приведене в вихідних даних обирається в залежності від регіону). Загасання на ділянці, що викликане дощем, можна знайти за формулою:

$$A = \psi \cdot k \cdot R^{\alpha}, \quad \partial Б \quad (4.18)$$

де k = 0,00454, α = 1,327 - коефіцієнти регресії для заданого частотного діапазону, як функції частоти і поляризації.

Розрахунок неготовності, що спричинена дощем, буде проведений для горизонтальної поляризації, тому що в цьому випадку загасання електромагнітної хвилі в опадах вище.

Неготовність, спричинену дощем, можна знайти за формулою:

$$P_{ДОЖ} = 10^{11.628 \cdot \left(-0.546 + \sqrt{0.29812 + 0.172 \cdot \log\left(0.12 \cdot \frac{A}{M} \right)} \right)}. \quad (4.19)$$

Щоб запобігти уявним значенням, необхідно використовувати округлені значення A/M = 0,155, якщо A/M < 0,155.

4.4.5 Рефракція радіохвиль

Рефракцією називається викривлення траєкторії хвиль, що зумовлені неоднорідною побудовою атмосфери [15]. Коефіцієнт заломлення у тропосфері має вигляд:

$$n = \sqrt{\varepsilon} \approx 1 + \frac{\varepsilon + 1}{2}, \quad (4.20)$$

де ε - відносна діелектрична проникливість повітря, яка знаходиться за формулою:

$$\varepsilon = 1 + \left(\frac{1.552 \cdot 10^{-4}}{T} \right) \cdot \left(P + \frac{4810 \cdot e}{T} \right), \quad (4.21)$$

де - температура повітря за абсолютною шкалою;

$P-$ тиск повітря, ГПа (1ГПа = 1мбар);

$e-$ тиск водяної пари, Гпа.

Коефіцієнт заломлення *n*, як і *ε*, в діапазоні частот, у якому працює РРЛ, за величиною близький до одиниці, тому найчастіше користуються коефіцієнтом заломлення, вираженим в "N-одиницях":

$$N = (n-1)\cdot 10^{-6} \approx \left[\frac{\varepsilon - 1}{2}\right]\cdot 10^{6}. \qquad (4.22)$$

Величини *P*, *ε*, *T* залежать від висоти, тому й *N* теж є функцією висоти. Для нормальної атмосфери (стандартної, добре перемішаної) зміна *N* з висотою визначається виразом:

$$N(h) = 315\cdot e^{-(0.316\cdot h)}, \qquad (4.23)$$

де *h* - висота над поверхнею Землі, км.

Під величиною a_e розуміють таке значення радіусу Землі, при якому траєкторію радіохвиль можна вважати прямолінійною.

$$\frac{1}{a_э} = \left(157 + \frac{dN}{dh}\right)\cdot 10^{-6}. \qquad (4\ .24)$$

Для визначення кривизни променю на практиці використовується поняття коефіцієнту рефракції:

$$K = \frac{1}{\left(1 + R_З \cdot \frac{dN}{dh}\cdot 10^{-6}\right)}. \qquad (4.25)$$

Для нормальної атмосфери *dN/dh* = - 40. Відповідне значення *K* за формулою (3.25) дорівнює:

$$K = \frac{1}{\left(1 + 6370\cdot(-40)\cdot 10^{-6}\right)} = \frac{4}{3}.$$

Це значення необхідне використовувати в подальших розрахунках при моделюванні поширення радіохвиль.

5 РОЗРАХУНОК РАДІОРЕЛЕЙНОЇ ЛІНІЇ І ПОКАЗНИКІВ ЇЇ ЯКОСТІ

5.1 Розташування станцій

Методика розрахунку цифрових ліній наземного зв'язку відрізняється від методики розрахунку аналогових ліній [3, 16, 17]. Основна відмінність полягає в тому, що якість роботи цифрових ліній визначається помилками апаратури, а не за відношенням сигнал/завада.

Як приклад розрахунку цифрової радіорелейної лінії розглянемо розрахунок лінії на ділянці Коломия – Борщів на заході України [18].

Для економії частотного ресурсу при проектуванні РРЛ доцільно використання однакових частот на різних інтервалах траси. Повторення через інтервал тих самих частот допустимо, оскільки у діапазонах дециметрових і сантиметрових хвиль за відсутності прямої видимості між антенами ослаблення сигналу досить велике. Однак за деяких умов поширення радіохвиль, наприклад, при підвищеній рефракції, можливий прийом сигналу від станції, яка стоять на кілька інтервалів, що призводить до значних спотворень переданих сигналів. Щоб уникнути цього станції РРЛ розташовуються на ламаної лінії [19, 20]. При такому розташуванні паразитний сигнал додатково послаблюється за рахунок спрямованих властивостей антен.

Для перевірки кутового рознесення передачі на інтервалах траси розглянемо ситуаційну схему траси, яка наведена на рис. 5.1, та проведемо вимірювання кута рознесення сигналів. Азимут від Коломиї на Городенку становить $\theta_{К\text{-}Г} = 55{,}20$. Азимут від Коломиї на Борщів відповідно $\theta_{Г\text{-}Б} = 65{,}90$. Кутова різниця дорівнює:

$$\theta = \theta_{Г\text{-}Б} - \theta_{К\text{-}Г} = 10{,}7^0 .$$

На рис. 5.1 схематично показано напрямки від станції у місті Коломия на станції у містах Городенка та Борщів. Для зручності уявлення лінія Коломия-Борщов показана горизонтально, але значення кутів збережено. Значення кутової різниці становить більш ніж 10^0, тобто відповідає вимогам сумісності передачі на однакових частотах в сусідніх інтервалах. Дані про відстані між станціями на трасі, отримані з

атласу автомобільних доріг і топографічних карт місцевості [18].

Ділянка Коломия - Борщів є частиною більшої траси, яка продовжується далі на схід на напрям міста Смотрич, і далі на Городок. Міста Коломия, Городенка, Борщів та Смотрич знаходяться приблизно на одній прямій лінії (кутова різниця невелика, трохи більш ніж 10^0), тому при організації лінії зв'язку обрано чотири частотний план. Це зроблено для запобігання інтерференційним спотворенням сигналу, що можуть виникнути при прямолінійній ділянці траси.



Рис. 5.1 Ситуаційна схема траси радіорелейної лінії

Крім того, у таблиці 5.1 наведено деякі дані, які будуть необхідні для розрахунку якісних показників ділянки радіорелейної лінії, а саме: довжини інтервалів, характер місцевості, інтенсивність дощу, градієнт показника заломлення та дисперсія електричної проникності повітря.

Таблиця 5.1

Характеристика траси радіорелейної лінії

Характеристика	Інтервал	
	Коломия - Городенка	Городенка - Борщів
Довжина, км	34	35
Характер місцевості	Горбиста	
Інтенсивність дощу, мм/год	70	
Градієнт n, 1/м	$-10*10^{-8}$	
Дисперсія ε, 1/м	$9*10^{-8}$	

Інші дані, такі як характеристика профілів інтервалів наводяться нижче, де проводиться розрахунок профілів трас і висот підвісу антен.

Ситуаційна схема траси дає уявлення про взаємне розташування станцій і дозволяє визначити кутову різницю напрямків передачі, яка підводить до наступних завдань: розрахунок профілів інтервалів та розрахунок висот підвісу антен.

5.2 Розрахунок профілів інтервалів

Профілем інтервалу називається креслення вертикального розрізу місцевості в напрямку від однієї станції до іншої із зазначенням на ньому характеристики місцевості (ліси, пагорби, висотні будови тощо) [19].

При розрахунку профілю інтервалу необхідно враховувати теоретичний профіль поверхні Землі, тобто враховувати кривизну Земної поверхні та додавати до нього висоти місцевості. Першим етапом обчислення профілю є розрахунок лінії умовного нульового рівня (ЛУНР) за формулою

$$y_{i(км)} = \frac{R_0 \cdot R_i}{2a}\left(1 - \frac{R_i}{R_0}\right), \qquad (5.1)$$

де R_0 - довжина інтервалу (відстань між сусідніми станціями);

R_i - відстань від початку відліку до певної точці;

a - радіус Землі (6370 км).

Для зручності проведення розрахунків введемо відносну відстань до точці на інтервалі з певною висотою $K_i = R_i/R_0$. Завдяки цьому одержимо з (5.1) розрахункову формулу

$$y_{i(км)} = \frac{R_0^{\,2} \cdot K_i}{2a}(1 - K_i) \qquad (5.2)$$

Результати розрахунків за формулою (5.2) для інтервалу між містами Коломия та Городенка наведено у таблиці 5.2 та на графіку (рис. 5.2). У таблиці 5.2 наведено також вихідні дані по цьому профілю (відстань та висота певних точок на інтервалі, що розглядається).

Результати розрахунків за формулою (5.2) для інтервалу між містами Городенка та Борщів наведені в таблиці 5.3 і на графіку (рис. 5.3). Розрахунки виконані в середовищі Excel [21].

Таблиця 5.2

Результати розрахунку профілю інтервалу Коломия-Городенка

Параметр	Значення					
Відстань, км	0	2	4	6	8	10
Відносна відстань	0	0,061	0,121	0,182	0,242	0,303
Висота h, м	72	68	65	58	60	63
Висота ЛУНР $h_л$, м	0	4,866	9,105	12,716	15,699	18,053
$H = h + h_л$, м	72	72,867	74,105	70,716	75,699	81,053

Подовження таблиці 5.2

Параметр	Значення					
Відстань, км	12	14	16	18	20	22
Відносна відстань	0,364	0,424	0,485	0,545	0,606	0,667
Висота h, м	68	66	58	50	59	54
Висота ЛУНР $h_л$, м	19,780	20,879	21,350	21,193	20,408	18,995
$H = h + h_л$, м	87,780	86,879	79,350	71,193	79,408	72,995

Подовження таблиці 5.2

Параметр	Значення					
Відстань, км	24	26	28	30	32	34
Відносна відстань	0,727	0,788	0,848	0,909	0,970	1,030
Висота h, м	49	48	55	57	52	50
Висота ЛУНР $h_л$, м	16,954	14,285	10,989	7,064	2,511	-2,669
$H = h + h_л$, м	65,954	62,286	65,989	64,064	54,512	47,331

Таблиця 5.3

Результати розрахунків профілю інтервалу Городенка-Борщів

Параметр	Значення					
Відстань, км	0	2	4	6	8	10
Відносна відстань	0	0,057	0,114	0,171	0,229	0,286
Висота h, м	50	42	57	62	65	70
Висота ЛУНР $h_л$, м	0	5,181	9,733	13,658	16,954	19,623
$H = h + h_л$, м	50	47,181	66,733	75,658	81,954	89,623

Подовження таблиці 5.3

Параметр	Значення					
Відстань, км	12	14	16	18	20	22
Відносна відстань	0,343	0,4	0,4571	0,514	0,571	0,629
Висота h, м	75	72	65	68	66	54
Висота ЛУНР $h_л$, м	21,664	23,077	23,862	24,019	23,548	22,449
$H = h + h_л$, м	96,664	95,077	88,862	92,019	89,548	76,449

Подовження таблиці 5.3

Параметр	Значення					
Відстань, км	24	26	28	30	32	34
Відносна відстань	0,686	0,743	0,8	0,857	0,914	0,971
Висота h, м	62	70	78	78	84	80
Висота ЛУНР $h_л$, м	20,722	18,367	15,385	11,774	7,535	2,669
$H = h + h_л$, м	82,722	88,367	93,385	89,774	91,535	82,669

Креслення профілів наведено в наступному розділі, тому що на них показано визначення висот підвісу антен.

5.3 Визначення висот підвісу антен

Для визначення висот підвісу антен розрахуємо координату найвищої точки профілю інтервалу за формулою [10]

$$K_{\max} = \frac{R_{\max}}{R_0}, \tag{5.3}$$

де R_{max} - відстань від початку інтервалу до найвищої точки профілю.

Визначимо просвіт інтервалу при поширенні радіохвиль в вільному просторі за формулою (5.4)

$$H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot R_0 \cdot \lambda \cdot K_{\max} \cdot (1 - K_{\max})} \tag{5.4}$$

де λ - середня довжина хвилі.

Результати розрахунків за формулою (5.4) наведено у таблиці (5.3) для обох інтервалів ділянки траси.

Довгострокові спостереження показують, що приблизно 50% робочого часу

радіорелейної лінії проходить над умовах вільного простору, в умовах позитивної рефракції. Таким чином, поширення радіохвиль відбувається з невеликим обгинанням земної поверхні, тому реальний просвіт стає більшим у порівнянні з просвітом у вільному просторі. Такий інтервал називають відкритим, а збільшення просвіту характеризує приріст просвіту ΔH(q).

Визначимо збільшення просвіту ΔH(q) при позитивній рефракції, яка характерна для 50% робочого часу за формулою [11]:

$$\Delta H_{(\bar{q})} = -\frac{R_0^2}{4}\bar{q} \cdot K_{\max} \cdot (1 - K_{\max}) \qquad (5.5)$$

де, q - вертикальний градієнт показника заломлення атмосфери.

Результати розрахунків за формулою (5.5) наведено у таблиці (5.3) для обох інтервалів ділянки траси. Зазначимо, що вимоги до величини просвіту дещо протилежні: з одного боку він повинен бути достатнім, оскільки характеризує пряму видимість, з іншого боку він не повинен бути занадто великим, оскільки:

- зростає небезпека інтерференційних замирань, коли в точку прийому надходить основний сигнал і сигнал, який відбився від землі або від тропосфери і має протилежну фазу щодо основного сигналу;

- при великому просвіті мають бути більшими і щогли, тобто. зростають витрати з-за великої висоти опор, витрати на сигнальне освітлення веж, крім того зростають втрати на антенні фідери.

Розрахуємо та виберемо величину просвіту, яка є рекомендованою, за формулою (5.6):

$$H_{рек} = (1 \div 1.8) \cdot H_0 - \Delta H(\bar{q}) \qquad (5.6)$$

Рекомендоване значення величини просвіту може бути більшим, ніж те, що розраховано за формулою (5.4), тобто $H_{рек} > H_0$. Результати розрахунків за формулою (5.6) наведено у таблиці (5.3) для обох інтервалів ділянки траси.

Визначимо висоти підвісу антен радіорелейної лінії. Для цього скористаємося кресленнями профілів траси (рис. 5.2 та 5.3). Від найвищої точки профілю інтервалу

вертикально вгору відкладемо отриману величину $H_{рек}$. Через отриману точку ($H_{рмакс, проф} + H_{рек}$) проведемо пряму лінію паралельно до лінії, яка з'єднує висоти місцевості в кінцевих точках інтервалу. За такого способу розрахунку величини висот підвісу антен будуть приблизно однаковими. Методика визначення висот антен показана на рис. 5.2 та 5.3, а результати визначення висот антен наведені у таблиці 5.4.

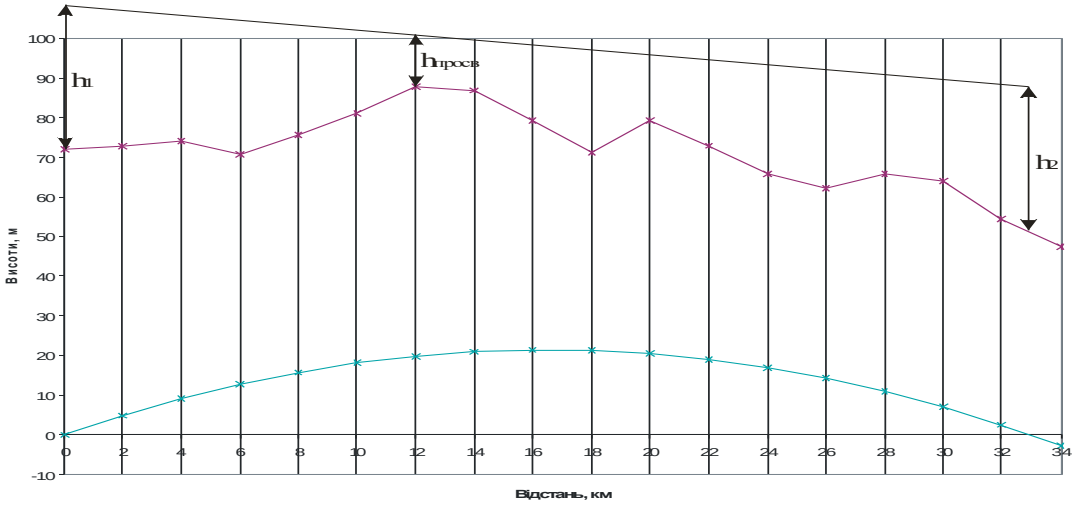


Рис. 5.2 Результати розрахунку профіля інтервалу Коломия-Городенка та визначення висот підвісу антен

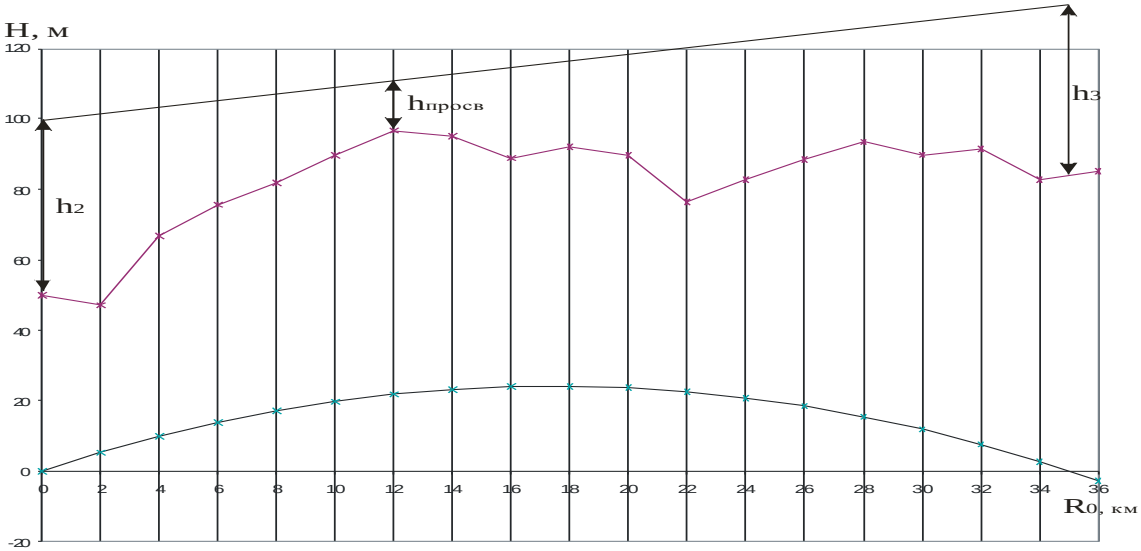


Рис. 5.3 Результати розрахунку профіля інтервалу Городенка-Борщів та визначення висот підвісу антен

Визначимо відносні просвіти інтервалів за формулою:

$$P_{(\bar{q})} = \frac{H + \Delta H(\bar{q})}{H_0} \tag{5.7}$$

Результати розрахунків за формулою (5.7) наведені в таблиці (5.3) для обох інтервалів ділянки траси. Всі розрахунки в цієї частині роботи та оформлення графіків виконані в середовищі Excel [21].

Таблиця 5.4

Результати розрахунку просвітів та висот підвісу антен

Інтервали	Параметри та їх значення					
	H_0, м	ΔH, м	$H_{рек}$, м	Відносний просвіт	h_1, м	h_2, м
Коломия-Городенка	10,158	5,04	13,245	1,8	37	37
Городенка-Борщів	10,323	5,52	13,061	1,8	51	51

Результати розрахунків, отриманих у цьому розділі, використовуються при визначенні якісних показників ділянки радіорелейної лінії.

5.4 Результати розрахунку якісних показників ділянки РРЛ

Розрахунки показників якості проведено за методикою, що описана в розділі 4. Розрахунки проведені для кожного інтервалу ділянки траси. Результатом розрахунків є значення коефіцієнта неготовності ділянки, яке знаходиться як сума коефіцієнтів неготовності кожного інтервалу. Вихідні дані для розрахунків наведено у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Вихідні дані для проведення розрахунків якісних показників ділянки РРЛ

Показники та одиниці вимірювання	Значення показників на інтервалах	
	Коломия-Городенка	Городенка-Борщів
Частота, ГГц	7,4	7,4
Довжина інтервалу, км	33	35
Висота підвісу антен, м	37	51
Коефіцієнт підсилення антен, дБ	43,6	43,6
Загасання фільтрів, дБ	0,5	0,5
Рівень потужності передавача, дБм	24	24
Пороговий рівень приймача, дБм	-69	-69
Розрахункова температура, град. С	-30	-30

Розрахунки проведено в наступному порядку: атмосферні втрати (втрати в

атомах кисню, парах води, сумарні); втрати у вільному просторі; рівень сигналу на вході приймача; запас на завмирання; ймовірність порушення зв'язку, що викликана наявністю багатьох променів випромінювання; ймовірність втрати зв'язку, що спричинена дощем; загальна неготовність лінії, яка викликана дощем та завмиранням.

Для цих розрахунків складена електронна таблиця в середовищі Excel. Розрахунки проведені для кожного інтервалу ділянки окремо, їх результати наведені у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Результати розрахунків якісних показників ділянки РРЛ

Показники та одиниці вимірювання	Значення показників	
	Коломия – Городенка	Городенка – Борщів
Загасання у вільному просторі, дБ	140,1971204	140,7082025
Запас на завмирання сигналу, дБ	36,77750603	36,22246191
Рівень сигналу на приймачі, дБм	-32,22249397	-32,77753809
Ймовірність завмирань	0,062599219	0,077368413
Ймовірність плоских завмирань	1,31467E-05	1,84636E-05
Ймовірність селективних завмирань	2,38986E-11	3,67839E-11
Сумарна ймовірність завмирань	1,31468E-05	1,84637E-05
Загасання на інтервалі, що викликане дощем, дБ	4,198546403	4,610831422
Неготовність, що викликана дощем	8,03277E-07	8,03277E-07
Загальний коефіцієнт неготовності	1,395E-05	1,9267E-05
Нормативний коефіцієнт неготовності	0,0125	0,0125

Загальна неготовність дільниці становить 3,322 10-5, що є меншим, ніж нормативне значення (таблиця 3.2). Таким чином, немає необхідності робити просторове рознесення сигналів та створювати додатковий канал зв'язку.

ВИСНОВКИ

У магістерській атестаційній роботі розглянуто методи розрахунку цифрових наземних радіоліній прямої видимості та методи розрахунку якості таких ліній. Особлива увага прикута до методів розрахунку якості, оскільки якісні показники цифрових радіоліній розраховуються на основі ймовірності виникнення помилок, а не за відношенням сигнал/завада, як для аналогових ліній.

Розглянуто розповсюдження радіохвиль ультра коротко хвильового діапазону у вільному просторі. Розглянуто вплив землі та земної атмосфери на розповсюдження радіохвиль. Особлива увага прикута до розрахунку якісних показників цифрових радіоліній прямої видимості. Розрахунок якості таких ліній базується на сучасних рекомендаціях Міжнародної спілки електрозв'язку. Проведено розрахунок ймовірності помилок для конкретного прикладу радіорелейної лінії на Заході України.

Розроблені практичні рекомендації щодо врахування впливів природних факторів на розповсюдження радіохвиль, значну увагу приділено врахуванню втрат в опадах (дощ, сніг, туман) та методам, які забезпечують достатню надійність зв'язку у складних метеорологічних умовах.

Приклад розрахунку виконаний з використанням обчислювальної техніки, використані електронні таблиці Excel для проведення розрахунків та побудови графіків.

Результати магістерської атестаційної роботи можна застосовувати як допоміжний матеріал під час проектування сучасних цифрових радіорелейних ліній зв'язку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи.–К.:НВП „Видавництво „Наукова думка” НАН України. 2008.–328с.:іл.

2. Белоконь О., Нестеренко Н. Радиорелейная связь//Сети и телекоммуникации. – 2008//. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: web: http://www.seti - ua.com.

3. Наритник Т.М. Радіорелейні та тропосферні системи передачі. - К: Концерн «Видавничий Дім «Ін Юре», 2003. - 336 с. :іл.

4. Долуханов М.Л. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1985.

5. Яманов Д.Н. Основы электродинамики и распространение радиоволн. Часть 2. Распространение радиоволн. Тексты лекций.- М: МГТУ ГА, 2005. – 100 с.

6. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов. – М: Высш. шк., 1992. – 416 с.

5. Анализ методов оценки качества сигнала: рекомендации G.821 и G.826. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: //http://www.tools.ru/tools/377595.html/.

7. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я.. «Конспект лекцій з дисципліни Супутникові та радіорелейні системи передачі». [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://dut.edu.ua/ua/lib/1/category/2122/view/863 .

8. Анализ методов оценки качества сигнала: рекомендации G.821 и G.826. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: //http://www.tools.ru/tools/377595.html/.

9. ITU-T Recommendation G.826. End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections (12/2002).

10. Наритник Т.М., Почерняєв В.М., Повхліб В.С. Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв'язку (основи розрахунку). – Навчальний посібник/ Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019. – 166с.

11. МСЭ-R Рекомендация P.837-5. Характеристики осадков, используемые при моделировании распространения радиоволн (Вопрос МСЭ-R 201/3) (1992-1994-1999-2001-2003-2007).

12. МСЭ-Р Рекомендация Р.530-13 (10/2009). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости. Серия Р. Распространение радиоволн.

13. МСЭ-R Рекомендация P.530-12 (02/07). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования наземных систем прямой видимости.

14. МСЭ-R Рекомендация P.838-3. Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования. (Вопрос МСЭ-R 201/3) (1992-1999-2003-2005).

15. Рефракція радіохвиль в тропосфері. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://studfile.net/preview/5382100/page:11/

16. Kizer G. Digital microwave communication: engineering point-to-point microwave systems, John Wiley & Sons, Inc., 2013. –754 p

17. Tomasi W. Advanced Electronic Communications Systems, Harlow: Pearson Education Limited, 2014. – 621p.

18. Атлас автомобильных дорог Украины, НВП “Картография”, 1999р.

19. Системи передавання радіорелейні прямої видимості. Терміни та визначення. ДСТУ 3936-99.

20. Системи передавання радіорелейні прямої видимості. Класифікація. Основні параметри. Методи вимірювання. ДСТУ 3937-99.

21. Microsoft Learn https://learn.microsoft.com

ПРЕЗЕНТАЦІЯ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:

Аналіз поширення радіохвиль в наземних системах прямої видимости

Студент: Демидов Михайло Олексійович
гр. ТСДМ-61

Київ - 2025

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ РОБОТИ