

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Інфокомунікацій

(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

(позначення документа)

«Дослідження дальності зв'язку в радіомережі із використанням  
повітряного ретранслятора»

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи ІМІм 20-2

Шейко П.Ю.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та  
радіотехніка»

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма інформаційно-мережна  
інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Іваненко С. А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_

(підпис)

Безрук В.М.

\_\_\_\_\_

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

*/Шейко П.Ю./*

Керівник

*/Іваненко С.А./*

Харківський національний університет радіоелектроніки  
(повна назва вищого навчального закладу)

Факультет Інфокомунікацій  
Кафедра інформаційно-мережної інженерії  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
Тип програми освітньо-наукова  
Освітня програма інформаційно-мережна інженерія

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІМІ

проф. Безрук В.М.

“ ” 2022 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ**

Шейку Павлу Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження характеристик радіомережі із використанням повітряного ретранслятора»

керівник роботи к.т.н. доц. Іваненко Станіслав Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНЗ від «14» березня 2022 року № 379Ст

2. Строк подання студентом роботи 26 травня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Розглянути задачі і обладнання мереж радіозв'язку УКХ діапазону, проаналізувати методи збільшення дальності радіозв'язку, розглянути реалізації наземних і повітряних пунктів радіоретрансляції, провести необхідні розрахунки та запропонувати обладнання щодо реалізації запропонованого варіанту збільшення дальності радіомережі.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Аналіз задач радіозв'язку у сучасному світі та суспільстві

2. Аналіз особливостей розповсюдження радіохвиль у реальних умовах

3. Провести аналіз методів збільшення дальності радіозв'язку

4. Провести розрахунок параметрів повітряного вузла радіоретрансляції

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Слайди у форматі Power Point (назва та мета роботи, основне призначення та задачі радіозв'язку у сучасному світі та суспільстві, принципи радіозв'язку та аналіз особливостей поширення радіохвиль, передача інформації за допомогою ретрансляції, аналіз несучого устаткування повітряного ретранслятора, технічне завдання, вибір радіоприймального та радіопередавального обладнання, вибір типу антенн та устаткування вузла ретрансляції, результати, висновки тощо)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів атестаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	14.03 – 17.03.22	
2	Аналіз літератури за темою роботи.	18.03 – 25.03.22	
3	Виконання розділу 1	26.03 – 10.04.22	
4	Виконання розділу 2	11.04 – 20.04.22	
5	Виконання розділу 3	21.04 – 26.04.22	
6	Виконання розділу 4	27.04 – 05.05.22	
7	Оформлення пояснювальної записки	06.05 – 11.05.22	
8	Оформлення презентаційного матеріалу,		
9	підготовка до захисту у ЕК	12.05 – 20.05.22	

Дата видачі завдання 14.03.2022 р.

Студент \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (Шейко П.Ю.) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (Іваненко С.А.) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 67 с., 19 рис., 4 табл., 13 джерел, 4 додатки

Об'єкт роботи – повітряний ретранслятор для радіомережі

Мета роботи – аналіз і розробка повітряного пункту ретрансляції для радіомережі, який дозволить збільшити дальність зв'язку.

В роботі виконаний аналіз без ліцензійних стандартів радіозв'язку для цивільного використання, вибране обладнання та проведення розрахунків необхідної параметрів підвісу повітряного ретранслятора, отримані рекомендації.

**БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, ПОРТАТИВНА РАДІОСТАНЦІЯ, ПРЯМА ВИДИМІСТЬ, ПОВІТРЯНИЙ РЕТРАНСЛЯТОР, ВАOFENG UV-5R, УКХ.**

## THE ABSTRACT

Explanatory note: 67 p., 19 fig., 4 tables, 15 sources, 4 appendixes

The object of research is the air repeater for radio network

The purpose of the work is to analyze and develop an air relay point for the radio network, which will increase the range of transmission.

The analysis is performed without licensed radio communication standards for civil use. The equipment was selected and calculations of the necessary parameters of the air repeater suspension were performed, recommendations were received.

WIRELESS COMMUNICATION, PORTABLE RADIO STATION, DIRECT VISIBILITY, AIR REPEATER, BAOFENG UV-5R, VHF.

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ РАДІОЗВ'ЯЗКУ У СУЧАСНОМУ СВІТІ ТА СУСПІЛЬСТВІ .....	10
1.1 Комерційний радіозв'язок.....	10
1.2 Аналіз стандартів персонального зв'язку для цивільного використання .	11
2 ПРИНЦИПИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ТА АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ .....	17
2.1 Аналіз розповсюдження радіохвиль в реальних умовах .....	17
2.2 Особливості поширення УКХ.....	24
3 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДІЇ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ .....	28
3.1 Принципи передачі інформації за допомогою ретрансляції ... ..	28
3.2 Активна ретрансляція .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b> 29
3.3 Пасивна ретрансляція .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b> 0
3.4 Аналіз несучого устаткування повітряного вузлу ретрансляції ....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b> 2
4 РОЗРОБКА ВУЗЛУ РЕТРАНСЛЯЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ РАДІОСТАНЦІЙ. 40	
4.1 Технічне завдання .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b> 40
4.2 Вибір радіоприймального та радіопередавального обладнання ....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b> 0
4.3 Вибір типу антенн та устаткування вузла ретрансляції	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b> 4
4.4 Розрахункова частина .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	51
ДОДАТОК А КАНАЛИ ЧАСТОТ СВ .....	52
ДОДАТОК Б КАНАЛИ ЧАСТОТ LPD433.....	53

	8
ДОДАТОК В КАНАЛИ ЧАСТОТ PMR446 .....	54
ДОДАТОК Г СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	57

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AM – амплітудна модуляція;

AGC – Automatic Gain Control – автоматичне регулювання посилення;

CB (англ. Citizen`s Band)– стандарт цивільного зв'язку на частоті 27 МГц;

DMR (англ. Digital Mobile Radio) – рухомий цифровий радіозв'язок;

ECC (англ. Electronic Communications Committee) – комітет електронних комунікацій;

FM (англ. Frequency Modulation)– частотна модуляція;

LPD433 (англ. Low Power Device)– стандарт пристроїв із малою потужністю на частотах 433 МГц

LSB (англ. Lower Side Band) – однополосна модуляція із нижньою бічною смугою;PMR446 (англ. Private Mobile Radio)– стандарт персонального мобільного радіо на частоті 446 МГц;

PTT (англ. push to talk) – кнопка активації передачі;

RDA – пряме перетворення радіочастоти за допомогою програмної обробки;

SSB (англ. Single Side Band) – однополосна модуляція;

USB (англ. Upper Side Band) – однополосна модуляція із верхньою бічною смугою;

VOX (англ. voice operated exchange, также voice operated switch) – передача із активацією голосом;

APC – автомобільна радіостанція;

БПЛА –безпілотний літальний апарат;

ЕМХ – електромагнітні хвилі;

СРС – стаціонарна радіостанція;

ПВХ – полівініл хлорид.

ПРС – портативна радіостанція;

ПРХ – поширення радіохвиль;

УДЦР – український державний центр радіочастот;

## ВСТУП

Неможливо представити життя та взаємодію сучасного розвиненого інформаційного суспільства без засобів передачі інформації. Телекомунікаційні пристрої набули видатного розвитку і продовжують вдосконалюватися.

Особливе місце займають технологію бездротового зв'язку. Атже вони є основою мобільності і мобільних технологій в цілому. Для сучасного і динамічного способу життя людей це є вкрай важливим та зручним.

На поточний час значна кількість території нашої країни охоплена покриттям різних операторів мобільного зв'язку і продовжує розширюватися.

Проте існують місця, де послуги зв'язку відсутні: це може бути передмістя, або просто віддалена місцевість від населених пунктів. Зв'язок на таких територіях може бути необхідний під час проведення геологрозвідки, операцій з порятунку, забезпечення зв'язком військових або сільській діяльності.

Вирішенням проблеми може стати використання ретранслятора, який дозволить збільшити дальність зв'язку. При цьому увага приділялась саме легкорозгортуючим тимчасовим рішенням, які дозволяють виконувати поставлену задачу із мінімальними часовими та фінансовими втратами.

# 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧ РАДІОЗВ'ЯЗКУ У СУЧАСНОМУ СВІТІ ТА СУСПІЛЬСТВІ

## 1.1 Комерційний радіозв'язок

Сучасний радіозв'язок – це велика кількість технологічних рішень, які дозволяють здійснювати прийом і передачу різноманітної інформації за допомогою радіохвиль, які розповсюджуються у навколишньому середовищі.

Сучасне суспільство в першу чергу є інформаційним суспільством. Його розвиток та життєдіяльність визначаються саме інформаційними процесами. А враховуючи такий немаловажливий аспект як мобільність – найбільший розвиток зараз отримують саме радіотехнології, які володіють всіма перевагами бездротового зв'язку.

Крім звичного ефірного телевізійного та радіомовлення застосовується цілий ряд технологій, які призначені для встановлення стабільного зв'язку між абонентами, які знаходяться в різних точках планети (супутниковий зв'язок, морський зв'язок, спеціальний радіозв'язок).

Наприклад, розглянемо найрозповсюдженіший вид радіозв'язку – це стільниковий зв'язок. Це один із видів мобільного радіозв'язку, в основі якого лежить використання стільникової мережі. Особливість стільникового зв'язку полягає в тому, що зона покриття ділиться на «стільники», які визначають зони покриття окремих базових станцій. Стільники частково перекриваються й разом утворюють мережу. Це дозволяє отримувати безрозривний зв'язок під час переміщення у просторі [1].

Послуги стільникового зв'язку надають оператори зв'язку, вони розробляють тарифні плани, та знімають плату за користування їх послугами. Однак не зважаючи на це, існують такі місця, де послуги мобільного зв'язку відсутні через те, що немає покриття території де знаходиться абонент (рис.1.1).

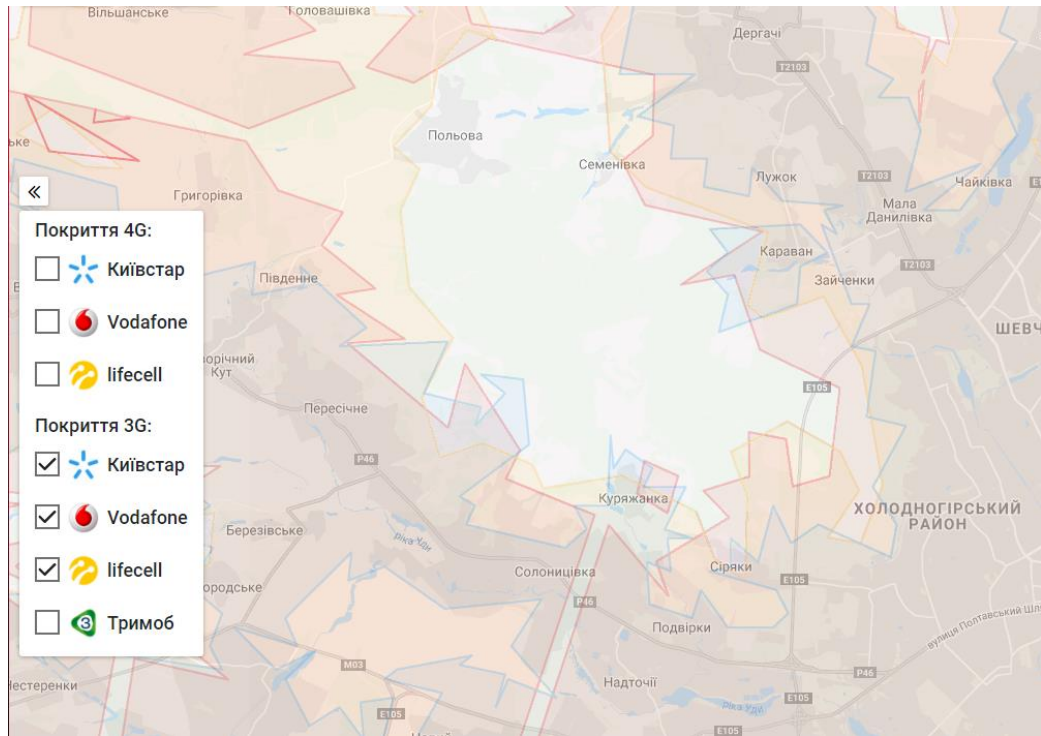


Рисунок 1.1 – Зони покриття операторів зв'язку у передмісті Харкова.

На рис. (1.1) можна побачити, що досить велика частка території залишається без покриття. Таку ситуацію можна спостерігати на досить значній частині територій. Проте це не означає, що на цих ділянках зв'язок непотрібний.

## 1.2 Аналіз стандартів персонального зв'язку для цивільного використання

На територіях, на яких відсутні послуги комерційної телефонії зв'язок може бути потрібний епізодично, як для цивільного використання так і для відомчих структур (МНС, МВС, військові і т.д.).

Виходом із такої ситуації може бути використання портативних радіостанцій, що можуть задовільнити потреби зв'язку в залежності від ситуації.

Сьогодні практично кожен знає, що таке портативна радіостанція. Це пристрій бездротового зв'язку, який може приймати і передавати сигнал на певній частоті із однотипним обладнанням.

Портативні радіостанції давно увійшли у повсякденне життя: ними користуються як службові установи, будівельники, спортсмени, мисливці так і звичайні громадяни. Перевага їхнього використання полягає в тому, що вони надають швидкий, дешевий і простий двосторонній зв'язок.

Розглянемо основні безліцензійні стандарти та діапазони частот, які є найбільш популярними.

Існує три основних найпопулярніших стандарти цивільного безліцензійного радіозв'язку, це LPD433 (англ. Low Power Device), PMR446 (англ. Private Mobile Radio) та CB (англ. Citizen`s Band), розглянемо коротко кожен з них.

CB (англ. Citizen`s Band) – безліцензійний діапазон, доступний громадянам для проведення радіозв'язку на коротких хвилях в діапазоні 27 МГц (в деяких країнах «CB» позначається будь-який вид безліцензійного радіозв'язку на вільних діапазонах). Залежно від країни використання цього діапазону або мінімально регламентується правилами проведення локальних зв'язків, або не регламентується зовсім [2].

До недавнього часу, необхідно було мати при собі дозвіл на право експлуатації. Але тепер скасовано реєстрацію радіостанцій CB потужністю до 10 Вт, дозволів та будь-яких інших документів на право використання портативною або авто радіостанцією не потрібно.

Для юридичних осіб, при використанні базових станцій цивільного радіозв'язку, потрібне отримання позивного сигналу розпізнавання в УДЦР.

Допустимі види модуляції:

- амплітудна - AM;
- частотна - FM;
- односмугова - SSB (верхня бічна смуга - USB, нижня бічна смуга - LSB).

Розділення частот за каналами відбувається за допомогою «сіток». Кожен канал відстоїть один від одного на 10 кГц. Частотних сіток нараховується близько 10 (A, B,C,D,E,F,G,H,I,J). Розподіл частот за ними наведений у додатку А.

Один і той самий канал може працювати як в «0» так і в «5» (нулі прийняті в європейській сітці, п'ятірки в країнах СНД).

- Канал С9 – канал лиха. Частота 27,065 МГц. Використовується частотна модуляція (FM).

- Канал С15 – канал спілкування далекобійників. Частота 27,135 МГц. Використовується амплітудна модуляція (АМ).

- Канал С19 – міжнародний інформаційний канал. У країнах СНД поширення не отримав.

Засоби радіозв'язку цього діапазону є переносними або стаціонарними радіостанціями (рис. 1.2), що відрізняються, як правило, від професійних радіостанцій нижчою ціною, меншою кількістю функцій (відсутність телеграфного режиму, однополосної модуляції, репітерного зсуву, тонових і кодових шумопридушувачів, транкових модулів і т. п.).



а)



б)

Рисунок 1.2 – Портативна (а) та автомобільна (б) радіостанції СВ діапазону.

Їхні технічні характеристики спрямовані для цивільного вжитку, через це вони, як правило, неударостійкі і невологостійкі. Як виняток, серійно виробляються радіостанції цивільного діапазону з розширеними функціями для радіоаматорів і фанатів радіозв'язку [2].

Можливості застосування СВ зв'язку доволі широкі. Це досить надійний і доступний засіб зв'язку, що дозволяє зв'язати, наприклад, магазин зі складом, склад з автотранспортом і т.д.

Можна використовувати СВ радіозв'язок і на маломірному флоті - на катерах і яхтах. При цьому дальність зв'язку на воді значно зростає за рахунок відсутності серйозних перешкод. Найбільш масове застосування СВ радіозв'язок знайшов в якості рухомого зв'язку. Радіостанції в автомашинах дозволяють підтримувати постійний контакт між собою, отримувати оперативну інформацію про ситуацію на дорозі, допомогу при виборі маршруту, допомога при аваріях і технічні несправностях в дорозі [3].

Приблизні відстані зв'язку (залежить від багатьох факторів):

- ПРС-ПРС - 1,5-7 км;
- ПРС -АРС - 3-10 км;
- ПРС-СРС - 5-15 км;
- АРС-АРС - 15-30 км;
- АРС-СРС - 25-50 км;
- СРС-СРС - 20-100 км;

Застосування портативних СВ радіостанцій дещо проблематично, так як в діапазоні СВ довжина хвилі становить 11 метрів, і повноцінна чвертьхвильова антена має довжину  $\sim 2.7$  метра. Для СВ – портативні РС, антени доводиться геометрично вкорочувати в 10-20 разів, що істотно знижує дальність зв'язку. Крім того, переносні СВ радіостанції відрізнялися досить великою вагою (близько 800 г), низьким ККД передавача при роботі на компактну антену і низькою ефективністю амплітудного шумопридушувач - в результаті і дальність зв'язку, і економічність подібних радіостанцій були невеликі. Тому практично всі такі радіостанції були зняті з виробництва [2].

Слід відзначити, що частоти СВ діапазону виділені на вторинній основі. Раніше цей діапазон частот призначався для промислових, наукових та медичних застосувань, зараз тут можна зайти і пульти дистанційного керування

іграшками і т.д. В наслідок цього на даному діапазоні можна приймати різноманітні перешкоди, які суттєво погіршують якість зв'язку [3].

Розглянемо наступні стандарти зв'язку LPD433 та PMR446.

LPD (англ. Low Power Device) — загальна назва діапазону частот в межах 433,05—434,79 МГц, у якому дозволена робота радіопереговорних пристроїв, пристроїв телеметрії і сигналізації з максимальною дозволеною потужністю передавача до 10 мВт.

У більшості країн світу в цьому діапазоні дозволена робота пристроїв без спеціальних дозволів і ліцензій за умови дотримання певних обмежень (використання вбудованої антени з коефіцієнтом підсилення не більше 0dBi). В Україні на безліцензійній основі у LPD діапазоні дозволена робота радіопереговорних пристроїв, пристроїв телеметрії та радіодистанційного керування з обмеженням потужності у 10 мВт, та пристроїв медичного призначення з обмеженням потужності у 1кВт [4].

Але насправді, багато пристроїв LPD-діапазону має вихідну потужність більше за 10мВт, у тому числі це стосується передавачів двостороннього зв'язку автосигналізацій; передавачі датчиків побутових метеостанцій а також радіоаматорські радіостанції та ретранслятори, потужність передавачів котрих може складати одиниці і десятки ват, але вони вже потребують ліцензій для використання [4].

При виборі каналу (дод. Б) для спілкування між собою зверніть увагу, що канал LPD 35 (фактично від 34 до 38) використовується автомобільними сигналізаціями, що суттєво заважає надійності зв'язку через спонтанні потужні завади. На деяких каналах радіозавади можуть бути постійними, на інших каналах може бути періодична передача якихось телеметричних даних, яка звучить або як постійне шипіння, або як багатотональні посилки.

PMR446 (англ. Private Mobile Radio) – це європейська безліцензійна система рухомого радіозв'язку на УКХ. Працює в діапазоні частотот 446,000-446,200 МГц дозволена максимальна вихідна потужність не більше 0,5 Вт. Призначена виключно для приватного використання і для задоволення

побутових потреб в радіозв'язку широких мас населення. Комплект радіостанцій відносно дешевий і розповсюджений у продажі [5].

Радіостанції стандарту PMR446 дозволені в більшості європейських країн. Директивою ERC (98) 25 від листопада 1998 року, яка виділила аналоговий діапазон 446.0-446.1 МГц, і наступними директивами (98) 26 і (98) 27 про відсутність ліцензування та вільному поширенні. Цифровий діапазон 446.1-446.2 МГц доданий Директивою ECC (05) 02 від жовтня 2005 для використання цифровими радіостанціями DMR [5].

Кількість радіоканалів в цьому стандарті коливається від 1-16 до 1-32 в залежності від ширини смуги каналу у 25 кГц та 6,25 кГц, розподіл частот за каналами наведений у додатку В.

Радіостанції, які працюють в діапазонах LPD433 та PMR446 фактично є одними і тими самими пристроями, так як за частотами це близькі діапазони і схемотехнічно це легко реалізується. До того ж такі станції доволі легкі та малогабаритні (вага 250-350 г).

За визначеними вище фактами, можемо зробити висновок, що радіостанції на базі стандарту СВ мають габарити більші ніж у LPD та PMR і досить малу ККД передавача в портативному виді, тому вони є мало зручними для реалізації системи рухомого зв'язку. До того ж слід відзначити вискою рівень промислових заводів в діапазоні 27 МГц. Отже зупинимо увагу саме на цих двох вищезгаданих УКХ діапазонах.

## 2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ТА БЮДЖЕТ РАДІОЛІНІЇ

### 2.1 Аналіз розповсюдження радіохвиль в реальних умовах

Електромагнітне випромінювання визначається формою коливань електричної і магнітної енергії, здатної поширюватися в просторі без допомоги фізичному з'єднанні.

Електромагнітні коливання характеризуються такими основними параметрами – довжиною хвилі  $\lambda$  (м), частотою коливань  $f$  (Гц), періодом коливань  $T$  (с), круговою частотою  $\omega$  (Гц), фазою  $\varphi$ , швидкістю поширення світла (м/с):

$$\lambda = cT; f = 1/T; \omega = 2\pi f; \varphi = \omega t. \quad (2.1)$$

Спектр електромагнітних коливань охоплює частоти приблизно від  $10^{-3}$  до  $10^{23}$  Гц. Частоти електромагнітних коливань нижче  $3 \cdot 10^{12}$  Гц відповідають радіохвилям і називаються радіочастотами. Спектр радіочастот зазвичай розбивається на 12 діапазонів. Кожен з діапазонів включає частоти від  $0,3 \cdot 10^N$  до  $3 \cdot 10^N$  Гц, де  $N = 1, 2, \dots, 12$  - номер діапазону. Відповідно до міжнародного «Регламенту радіозв'язку» 4–12 діапазони частот рекомендовані до використання радіотехнічними пристроями, засобами і системами та називаються радіочастотним спектром. У табл. 2.1 наведено класифікацію діапазонів радіочастот і радіохвиль [6].

У деяких випадках під діапазоном радіочастот розуміється область частот з іншими частотними межами, обумовленими організаційними або технічними міркуваннями. Часто вводиться поняття смуги радіочастот, тобто області радіочастот, що є частиною одного діапазону або частиною суміжних діапазонів радіочастот.

Різні ділянки спектра радіочастот мають різні властивості. Це обумовлює відмінності в призначенні, принципах побудови і технічних характеристиках радіо засобів, що функціонують в різних діапазонах.

Таблиця 2.1 – Класифікація діапазонів радіочастот і радіохвиль

Номер діапазону	Найменування діапазону			Межі діапазону	
	за частотою		за довжиною хвилі	за частотою	за довжиною хвилі
	повне	скор.			
1	Вкрай низькі частоти	ВНЧ	Декамегаметрові хвилі	3 – 30 Гц	100000 – 10000 км
2	Наднизькі частоти	ННЧ	Мегаметрові хвилі	30 – 300 Гц	10000 – 1000 км
3	Інфранизькі частоти	ІНЧ	Гектокілометрові хвилі	300 – 3000 Гц	1000 – 100 км
4	Дуже низькі частоти	ДНЧ	Міріаметрові хвилі	3-30 кГц	100 – 10 км
5	Низькі частоти	НЧ	Кілометрові хвилі	30 – 300 кГц	10 – 1 км
6	Середні частоти	СЧ	Гектометрові хвилі	300 – 3000 кГц	1000 – 100 м
7	Високі частоти	ВЧ	Декаметрові хвилі	3-30 МГц	100-10 м
8	Дуже високі частоти	ДВЧ	Метрові хвилі	30-300 МГц	10-1 м
9	Ультрависокі частоти	УВЧ	Дециметрові хвилі	300-3000 МГц	1000-100 мм

Розповсюдження радіохвиль уздовж сферичної поверхні Землі і часткове огинання її можливе внаслідок явища дифракції. Здатність хвилі огинати перешкоди і дифрагувати навколо них, як відомо, визначається співвідношенням між довжиною хвилі і розмірами перешкод. Чим коротше довжина хвилі, тим слабкіше виявляється дифракція. З цієї причини хвилі діапазонів УВЧ і вище дуже слабо дифрагують навколо поверхні земної кулі і

дальність їх поширення в першому наближенні визначається відстанню прямої видимості (прямі хвилі) [6].

В діапазоні частот 30 – 3000 МГц радіохвилі діапазонів ДВЧ і УВЧ, що поширюються за рахунок розсіювання на неоднорідностях тропосфери на відстань до 1000 км. Ці радіохвилі, розповсюджуються у вільному просторі від одного об'єкта до іншого, наприклад, від одного космічного апарату до іншого, в деяких випадках, від земної станції до космічного апарату або повітряного судна і між атмосферними апаратами або станціями. Для цих хвиль впливом атмосфери, сторонніх об'єктів і Землі можна знехтувати [6].

Реальний розрахунок розподілення електромагнітного поля здійснюється на основі двох моделей – «великої відстані» та «малої відстані» [7]. В моделі «великої відстані» розглядається вплив на електромагнітне поле макроефектів, що обумовлені перешкодами великого розміру (в порівнянні з довжиною хвилі). Згідно з цією моделлю, електромагнітне поле в реальних умовах описується тими ж самими рівняннями, що і в вільному просторі, але з введенням в них коефіцієнтів корекції, що відображають реальні умови розповсюдження. Серйозного теоретичного обґрунтування того або іншого способу введення додаткових коефіцієнтів не існує.

Результатом розрахунку по моделі «великої відстані» є ймовірне значення рівня сигналу на деякій відстані від випромінювача.

Використовуючи модель «великої відстані» знайдемо математичний вираз (перше рівняння передачі), що визначає рівень сигналу в точці прийому.

При ПРХ у вільному просторі потужність їх послабляється. Це явище називають втратами при ПРХ і враховують коефіцієнтом втрат, що визначається як відношення потужності сигналу передавача  $P_{nd}$  до потужності сигналу на вході приймача  $P_c$  [8, 9, 7]

$$A = \frac{P_{nd}}{P_c} \quad (2.2)$$

Розглянемо випадок знаходження системи радіозв'язку в вільному просторі (рис. 2.1).

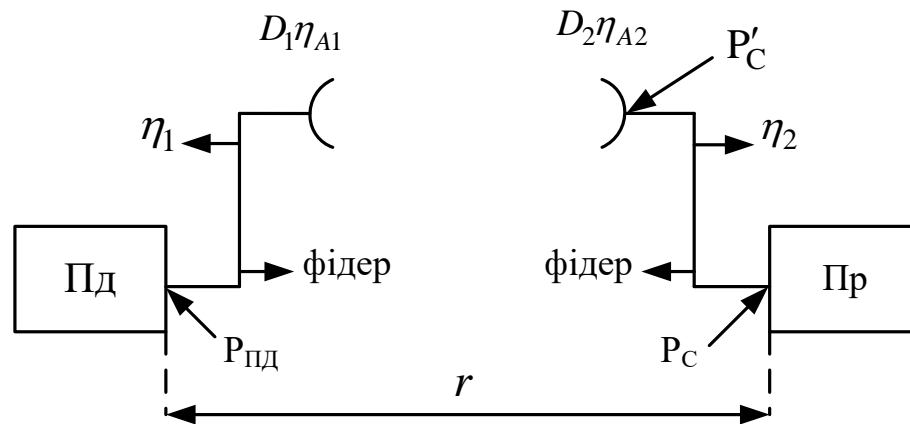


Рисунок 2.1 – До розрахунку повних втрат сигнала

На рисунку 2.1:

-  $D_1, \eta_{A1}, D_2, \eta_{A2}$  - коефіцієнти направленої дії й к.к.д. передавальної й приймальної антени відповідно;

-  $\eta_1, \eta_2$  - к.к.д. фідерів передавального й прийомного;

-  $Пд$  – передавач;

-  $Пр$  – приймач.

Величина потужності на виході прийомної антени  $P'_c$  дорівнює добутку щільності потоку потужності  $\Pi$  поблизу антени на ефективну площу антени  $S_{ef}$ , тобто площа фронту минаючої електромагнітної хвилі, із якої антена як би поглинає потужність

$$P'_c = \Pi \cdot S_{ef} \quad (2.3)$$

Ефективна площа антени пов'язана з к.н.д.  $D$  співвідношенням

$$S_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D_2 \quad (2.4)$$

При великій відстані  $r$  фронт хвилі у приймальній антені можна вважати сферичним, і тоді

$$\Pi = \frac{P_{nd} \cdot \eta_1 \cdot \eta_{A_1} \cdot D_1}{4\pi r^2}. \quad (2.5)$$

Підставивши в (1.21) формули (1.22) і (1.23), отримаємо

$$P'_C = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot P_{nd} \cdot \eta_1 \cdot D_1 \cdot \eta_{A_1} \cdot D_2 \cdot \eta_{A_2}. \quad (2.6)$$

При к.к.д. фідера прийомної антени  $\eta_2$  потужність сигналу на вході приймача  $P_c$  буде

$$P_c = P'_C \cdot \eta_2 = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot P_{nd} \cdot \eta_1 \eta_2 D_1 \eta_{A_1} D_2 \eta_{A_2}. \quad (2.7)$$

Тут  $D_2 \cdot \eta_{A_2} = G_2$  і  $D_1 \cdot \eta_{A_1} = G_1$ .

Підставимо вираз (1.25) в (1.20)

$$A = \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_1 \eta_2 G_1 G_2} \quad (2.8)$$

Вираз (2.28) визначає ослаблення сигналу при ПРХ у вільному просторі при реальних антенах, що мають фідери із втратами.

Для випадку ненаправлених антен (ізотропних випромінювачів) з фідерами без втрат  $G_1 = G_2 = 1, \eta_1 = \eta_2 = 1$  отримаємо

$$A_{cs.0} = \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (2.9)$$

Вираз (1.26) можна записати у вигляді

$$A_{cs} = \frac{A_{cs.0}}{\eta_1 \eta_2 G_1 G_2}. \quad (2.10)$$

Втрати сигналу можна виразити в дБ.

Тоді

$$A_{cs\text{дБ}} = 10 \lg A_{cs} = 20 \lg \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right) - \eta_1 \text{дБ} - \eta_2 \text{дБ} - G_1 \text{дБ} - G_2 \text{дБ}. \quad (2.11)$$

При цьому відстань  $r$  і довжина хвилі повинні виражатися в метрах.

Використовуючи вираз (1.28) можна записати

$$P_C = P_{nd} \frac{\eta_1 \eta_2 G_1 G_2}{A_{cs0}}. \quad (2.12)$$

Наведений вираз називають першим рівнянням передачі при зв'язку на УКХ.

Величину

$$V_0^2 = \lambda^2 / 16\pi^2 r^2 \quad (2.13)$$

називають послабленням радіохвиль в вільному просторі (при неспрямованих антенах).

Тоді

$$P_C = P_{nd} \eta_1 \eta_2 G_1 G_2 V_0^2. \quad (2.14)$$

Потужність сиг лану на вході приймача в дБВт визначається виразом

$$P_C \text{ дБВт} = P_{nd} \text{ дБВт} + G_1 \text{ дБ} + G_2 \text{ дБ} + \eta_1 \text{ дБ} + \eta_2 \text{ дБ} + V_0 \text{ дБ}, \quad (2.15)$$

де  $V_0 \text{ дБ} = 20 \lg V_0$ .

Втрати при поширенні радіохвиль у реальних умовах ураховуються введенням поняття множника ослаблення.

Фактично ЕМХ поширюються не у вільному просторі, а в реальних умовах. Внаслідок цього спостережуване в практиці значення поля буває звичайно інше, ніж розраховується з умови ПРХ у вільному просторі. Це реальне значення буває менше, а іноді й більше [10].

Основні причини цього наступні:

- наявність землі обумовлює появу відбитої від неї хвилі. Енергія цієї хвилі попадає в місце прийому (на вхід приймача) і підсумується з енергією прямого променя. Виникає явище інтерференції. Найбільш неприємним є випадок, коли відбитий сигнал приходить на вхід приймача в протифазі з основним. Сигнали віднімаються, а результуючий сигнал значно послабляється. Виникають інтерференційні завмирання;

- при низько підведених антенах Земля може змінювати еквівалентні параметри антен;

- наявність неоднорідностей атмосфери над землею викликає рефракцію радіохвиль, створює дифракцію, породжує відбиті хвилі й обумовлює поглинання енергії радіохвиль;

- на рівні сигналу позначається рельєф місцевості й метеоумови.

Вплив цих факторів на напруженість поля в місці прийому враховують шляхом введення множника ослаблення  $V$  стосовно поля вільного простору, що дорівнює

$$V = \frac{E}{E_{\text{ВІЛЬН}}}, \quad (2.16)$$

де  $E_{\text{вільн}}$  - напруженість поля в точці прийому при ПРХ у вільному просторі;

$E$  - напруженість поля в точці прийому при ПРХ у реальних умовах.

Потужність сигналу на вході приймача при ПРХ у реальних умовах дорівнює

$$P_C = P_{C \text{ ВІЛЬН}} \cdot V^2. \quad (2.17)$$

Звідси повні втрати на ділянці ПРХ складуть

$$A = \frac{P_{\text{нд}}}{P_C} = \frac{P_{\text{нд}}}{P_{C \text{ ВІЛЬН}} \cdot V^2} = A_{\text{св}} \cdot \frac{1}{V^2}. \quad (2.18)$$

Повні втрати сигналу при ПРХ у реальних умовах рівні

$$A_{\text{ПОВНЕ}} = \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_1 \eta_2 G_1 \cdot G_2 V^2}. \quad (2.19)$$

Вираз (2.19) показує, що повні втрати залежать від відстані між точками передачі і прийому, довжини хвилі ( $\lambda$ ), направлених властивостей антени ( $G_1 \cdot G_2$ ), к.к.д. фідерів ( $\eta_1 \eta_2$ ), рельєфу місцевості й метеорологічних умов ( $V$ ) [10].

## 2.2 Особливості поширення УКХ

Причиною рефракції радіохвиль у тропосфері є зміна діелектричної проникності повітря  $\varepsilon$  з висотою. В основі рефракції лежить явище переломлення радіохвиль на границі розподілу двох середовищ із різними коефіцієнтами переломлення.

Рефракція – скривлення траєкторії поширення радіохвиль. Тропосфера являє собою шарувату структуру, кожен шар, що має своє значення  $\varepsilon$  (рис.2.2) [8, 9].

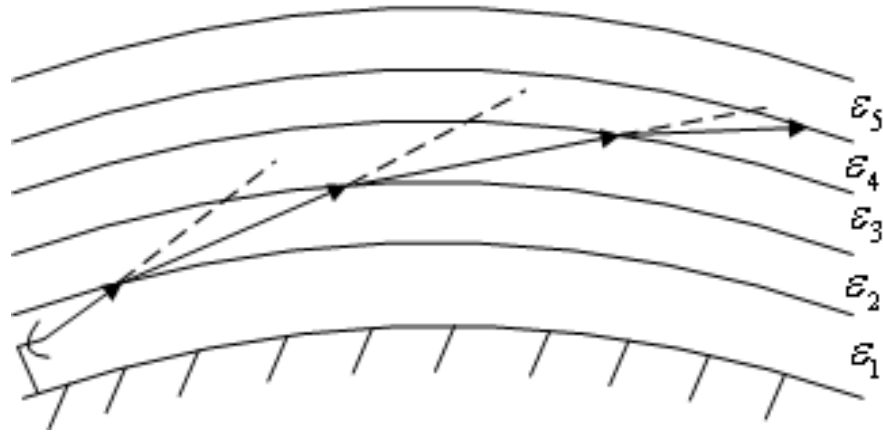


Рисунок 2.2 – До пояснення рефракції радіохвиль

На рис. 2.2 представлений випадок, коли діелектрична проникність  $\varepsilon(h)$  із висотою зменшується, тобто  $\varepsilon_1(h) > \varepsilon_2(h) > \varepsilon_3(h) > \varepsilon_4(h)$ . Вертикальний градієнт діелектричної проникності  $g = \frac{d\varepsilon(h)}{dh}$  в цьому випадку також убуває.

У залежність від значення  $g$  розрізняють два види рефракції:

- негативну рефракцію, або субрефракцію, при якій  $g > 0$ , і траєкторія хвилі звернена опуклістю вниз, і позитивну рефракцію, при якій  $g < 0$  і траєкторія хвилі звернена опуклістю вверх (рис. 2.3).

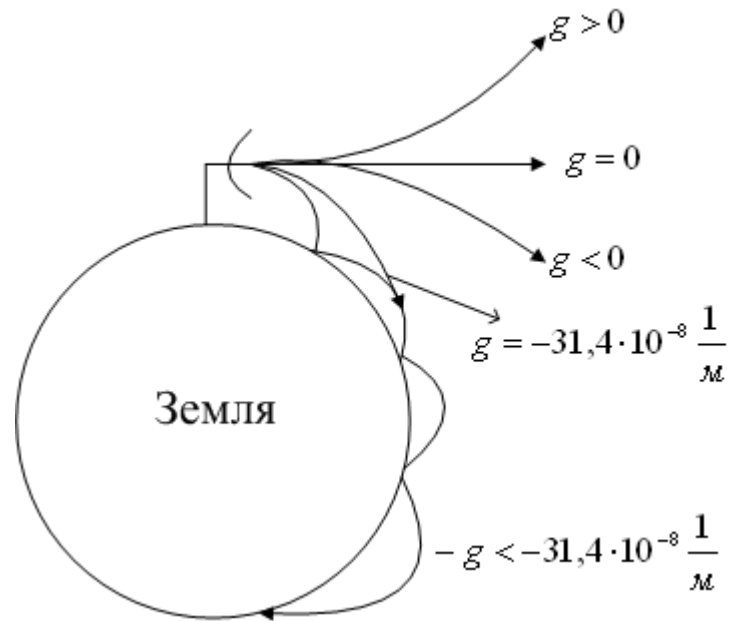


Рисунок 2.3 – Види рефракції

Тут:

$g > 0$  - негативна рефракція;

$g = 0$  - рефракція відсутня;

$g < 0$  - позитивна рефракція;

$g = -31,4 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$  - критична рефракція;

$g < -31,4 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$  - зверхрефракція.

Для урахування впливу рефракції на ПРХ вводиться поняття еквівалентного радіуса Землі

$$R_e = \frac{R}{\left(1 + \frac{Rg}{2}\right)}, \quad (2.20)$$

де  $R = 6370 \text{ км}$  – радіус Землі.

Найпоширеніша нормальна рефракція, при якій  $g = -8 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$ .

УКХ поширюються переважно в зоні горизонту.

Для орієнтовної оцінки безперешкодного поширення радіохвиль вводиться поняття відстані прямої видимості  $r_0$ , при якому пряма, що з'єднує передавальну й приймальню антени, торкається земної поверхні з еквівалентним радіусом  $R_e$  (рис. 2.4) [8,9].

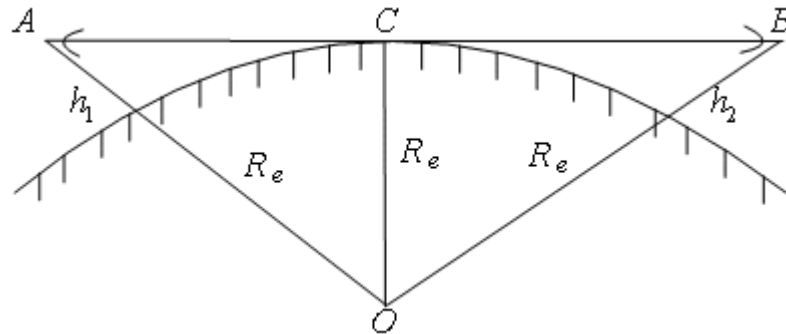


Рисунок 2.4 – До визначення відстані прямої видимості

Відстань прямої видимості  $r_0$  дорівнює з урахуванням рефракції  $r_0 = AC + BC$ , де

$$AC = \sqrt{(R_e + h_1)^2 - R_e^2}; \quad (2.21)$$

$$BC = \sqrt{(R_e + h_2)^2 - R_e^2}. \quad (2.22)$$

Тоді

$$r_0 = \sqrt{2R_e} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.23)$$

При відсутності рефракції

$$g = 0, \quad r_0 = 3,57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.24)$$

При стандартній рефракції

$$g = -8 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{м}}, \quad r_0 = 4,12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.25)$$

## 3 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДІЇ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

### 3.1 Принципи передачі інформації за допомогою ретрансляції

Поширення УКХ має одну специфічну особливість: вони поширюються тільки прямолінійно. Вони не можуть огинати земну поверхню, як довгі (ДХ) і середні (СХ) хвилі, і відбиватися від іоносфери, як короткі (КХ), тому стабільний радіозв'язок на УКХ можливий тільки в межах прямої видимості, тобто до лінії горизонту, радіус якої, в свою чергу, залежить від висоти підйому антени. Наприклад відстань прямої видимості для портативних радіостанцій, розрахована за формулою (2.24) зазвичай не перевищує 10 км, при умові розміщення антен на висоті 1,5м.

В свою чергу це накладає певні обмеження, щодо використання портативних радіостанцій на великих відстанях. Зустрічаються такі умови, коли впевнений прийом сигналу виявляється неможливий через надмірно низький рівень напруженості поля в точці прийому, який є меншим за чутливість радіоприймача. Це пов'язано з нерівностями рельєфу, малій потужності передавачів тощо.

Тому, як правило, дальність дії таких пристроїв, враховуючі вимоги портативності обладнання та енергоспоживання і ваги – невелика, і складає декілька кілометрів в залежності від умов. Але, як правило, зв'язок потрібен на суттєво більші відстані.

У цьому випадку для його забезпечення можливе використання ретранслятора рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Наземний ретранслятор

Радіоретранслятор – це комплекс обладнання, призначеного для забезпечення зв'язку між двома і більш радіопередавачами, віддаленими один від одного на великі відстані [11].

За допомогою використання ретрансляторів, при умові їх правильного розташування, такі фактори як несприятливий рельєф місцевості, коли точка прийому розташована за природною перешкодою (пагорб, будівля, тощо), можуть бути подолані. До того ж вони можуть збільшити пряму видимість, яка була обмежена кривизною земною поверхні та явищем рефракції (рис.2.4).

В наступних підрозділах розглянемо більш детально, яких типів буває ретрансляція.

### 3.2 Активна ретрансляція

Активний ретранслятор являє собою сукупність приймальної та передавальної антен (іноді це може бути фізично одна антена), та радіоприймального і радіопередавального устаткування. До активного обладнання також входить перетворювач частотного спектра необхідний для того, щоб передача сигналу ретранслятором проводилася на іншому частотному каналі  $F_2$  щодо того каналу  $F_1$ , за яким сигнал був прийнятий.

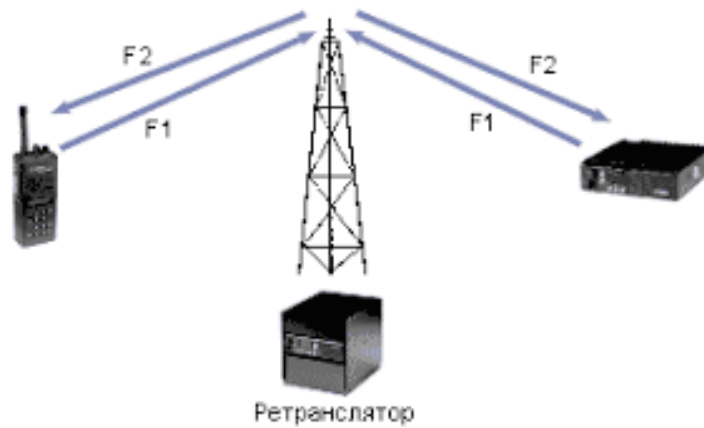


Рисунок 3.3 – Активний ретранслятор із зсувом спектра

Для установки ретранслятора використовуються вежі, які дозволяють підняти антени на необхідну висоту, для забезпечення необхідної зони обслуговування покриттям.

### 3.3 Пасивна ретрансляція

Пасивний ретранслятор відрізняється тим, що не містить приймально-передавальної або підсилювальної апаратури, а прийом і передача здійснюються виключно антенними системами.

Розрізняють пасивні ретранслятори трьох типів:

- заломлюючого;
- відбиваючого;
- типу перешкода.

Ретранслятор заломлюючого типу в найпростішому випадку являє собою комбінацію двох гостроспрямованих антен, одна з яких орієнтована на антену передавача, а друга спрямована в точку прийому. Таким чином, проводиться перевипромінювання сигналу в потрібному напрямку [11].

Ретранслятор відбиваючого типу виконується у вигляді одного або двох плоских антенних дзеркал, які забезпечують зміну напрямку поширення сигналу.

Пасивний ретранслятор типу перешкода був запропонований в 1954 р Айзенбергом і А.М. Моделем. Такий ретранслятор являє собою металеву поверхню, розташовану між передавачем і приймачем, що знаходяться відносно передавача в зоні тіні (рис.3.2) [11].

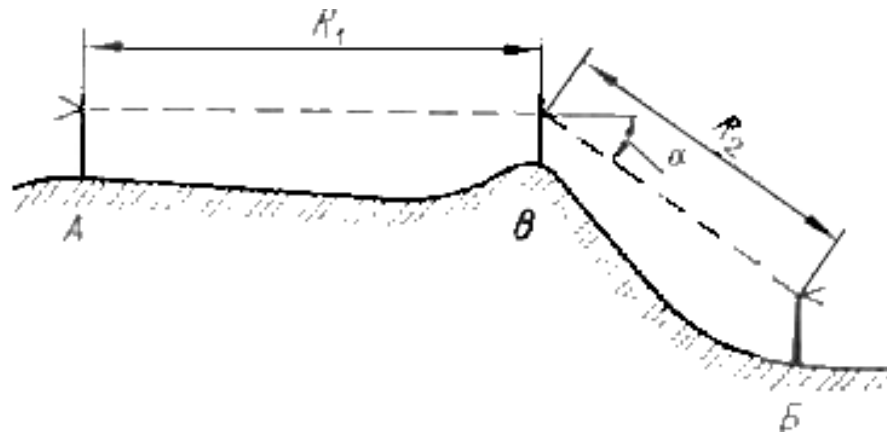


Рисунок 3.2 – До пояснення установки пасивного ретранслятора

За відсутності ретранслятора антена передавача, встановлена в точці А, практично не створює в точці прийому Б електромагнітного поля, так як точка прийому затінена. При установці на шляху поширення сигналу в точці В перешкоди, в точці Б виникає поле. Це пов'язано з тим, що перешкода відповідно до принципу Гюйгенса порушується падаючою на нього хвилею і стає джерелом вторинного випромінювання. При відповідному виборі форми і розмірів перешкоди напруженість поля в точці Б може виявитися значною і достатньою для впевненого прийому радіосигналу. Роль перешкоди в тому, що на трасі поширення сигналу утворюють поверхню з нульовою напруженістю поля на тій стороні, яка звернена до пункту прийому [11].

Деформації робочої поверхні ретранслятора типу перешкоди, викликані вітром, або відхилення її через неточності виготовлення не впливають на інтенсивність випромінювання і на рівень напруженості поля в точці прийому.

Це – основна перевага ретрансляторів типу перешкоди перед ретрансляторами заломлюючого і відбиваючого типів. Тому полотно ретранслятора типу перешкоди може бути виконано не у вигляді жорсткої

металевої конструкції, а у вигляді дротової сітки, жорсткість ж конструкції рами такої сітки визначається виключно необхідною механічною міцністю. Відпадає також необхідність виконання юстирування робочої поверхні ретранслятора після його установки, яка є обов'язковою для ретрансляторів заломлюючого і відбиваючого типів [11].

Пасивні ретранслятори типу перешкоди доцільно встановлювати в умовах, коли точка прийому закрита в напрямку на передавач близько розташованою високою перешкодою, а на вершині цієї перешкоди, на якій буде встановлено ретранслятор, напруженість поля сигналу досить велика [11].

При використанні пасивного ретранслятора приймальна антена повинна бути орієнтована в напрямку на його полотно не тільки за азимутом, але також і за кутом місця. Тому геометрична вісь антени виявляється не горизонтальною, як зазвичай, а повинна розташовуватися під відповідним кутом до горизонту.

Пасивний ретранслятор працює тільки на одній частоті, що обумовлено його фізичним принципом роботи.

### 3.4 Аналіз несучого устаткування повітряного вузлу ретрансляції

Організувати підйом на робочу висоту телекомунікаційного обладнання ретранслятора (зокрема антенного) можливо різними способами. У випадку із наземним ретранслятором це може бути антена щогла, будівля тощо.

Розглянемо більш детально яким чином можна виконати аналогічні дії у випадку використання повітряного ретранслятора. Основними носіями можуть бути повітряні судна та статичні кулі, які наповнені газом, який легший за повітря.

Основні вимоги до підйомного обладнання можуть бути наступними:

- максимальний час знаходження у повітрі;
- наявність необхідної підйомної сили;
- керованість;
- швидкість розгортання;

- кінцева вартість використання;
- багаторазовість;
- простота використання та розгортання.

Використання повітряного ретранслятору є більш складним з точки зору організації, але виправдовується екстремністю організації зв'язку там, де економічно не є доцільним використання стаціонарно наземного ретранслятора.

Це може бути актуальним під час проведення рятувальних, геологічно-розвідувальних або військових дій.

Розглянемо два варіанти носія, які є найбільш доступними та простими з точки зору використання: БПЛА та аеростат.

БПЛА набули свого широкого застосування у різних сферах життя, починаючи від сільського господарства, закінчуючи спортивним використанням.

БПЛА бувають двох різних типів: мультироторного та літакового типу. Представником мультироторного типу, який може виконувати роль носія для ретранслятору можна віднести квадрокоптер DJI Matrice 200 V2 (рис.3.3).



Рисунок 3.3 – Квадрокоптер DJI Matrice 200 V2

Другий тип БПЛА – літакового типу. У якості представника для використання повітряного ретранслятора можна відзначити модель літака із розмахом крила 1980 мм Volantex Ranger EX 757-3 (рис.3.4).



Рисунок 3.3 – Літак Volantex Ranger EX 757-3

В джерелі [12] наведена порівняльна характеристика різних типів БПЛА: літакового типу та роторного типу з точки зору тривалості польоту.

У [12] за допомогою програми eCalc було виконано оцінку змішаного часу польоту БПЛА літакового типу і часу висіння квадрокоптера і гексакоптера в залежності від ємності батареї. Ця оцінка дозволяє виконати подальше зіставлення різних систем в енергетичному відношенні. Під час аналізу необхідно враховувати, що чим більше ємність батареї, тим більше її вага, що призводить до збільшення польотної ваги літального апарату.

На рис. 3.4. представлений графік результатів розрахунку залежності польотного часу від ємності батареї. Перша крива для БПЛА літакового типу показує, що зі збільшенням ємності батареї час польоту збільшується майже лінійно. Крива обмежена тягоозброєністю моделі, при якій її стійкий політ не може бути реалізований [12].

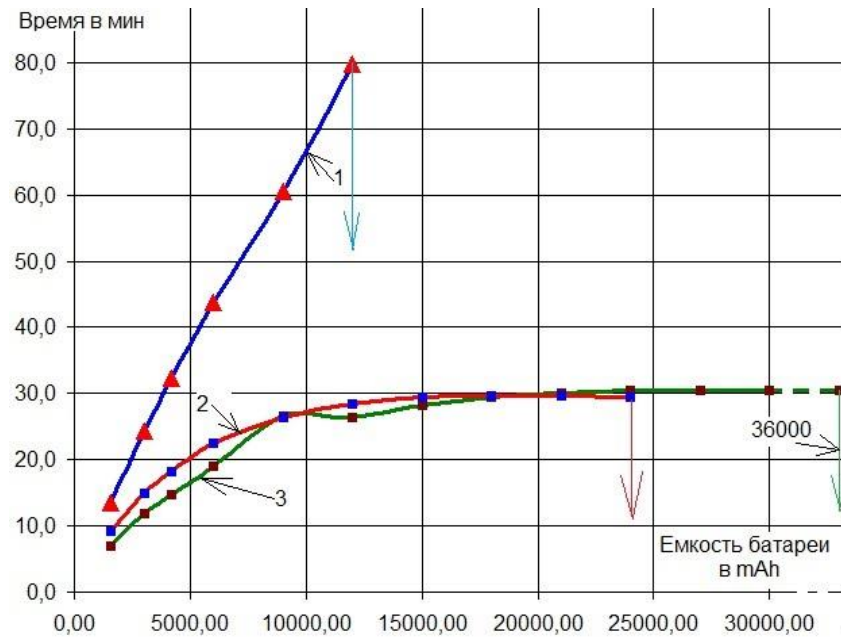


Рисунок 3.4 – Графік залежності польотного часу літака (1), квадрокоптера (2) і гексакоптера (3) від ємності акумулятора живлення

Розрахункова швидкість моделі літака для всього діапазону зміни кривої 1 становила 57 км/год. Максимальна розрахункова польотна вага склала 1624 г [12].

На рис. 3.4 друга крива відповідає квадрокоптеру. Видно, що для будь-якої ємності батареї максимальний час висіння не перевищує приблизно 30 хвилин. Обмеження кривої 2 є недостатня маневреність коптера за стіком газу. Максимальний розрахунковий польотний вага склала 2504 г. Максимальна розрахункова швидкість - 42 км/год для батареї 4200mAh, потім вона падає до 13 км/год. Для розглянутого коптера кращої ємністю для батареї є 6000mAh при часу висіння 23 хв [12].

Третя крива відповідає гексакоптеру. Видно, що для будь-якої ємності батареї максимальний час висіння також не перевищує приблизно 31 хвилини. Обмеження кривої 3 є недостатня маневреність коптера по стику газу. Максимальний розрахунковий польотний вага склала 3706 г. Максимальна розрахункова швидкість - 42 км/год для батареї 4200mAh, потім вона падає до

15 км/год. Для розглянутого коптера кращої ємністю для батареї є 9000mAh при часу висіння 27 хв. Видно, що гексакоптер може перебувати в повітрі з більшим навантаженням [12].

Таким чином із результатів аналізу можна зробити певні висновки: не дивлячись на незаперечні переваги БПЛА роторного типу, такі як маневреність, можливість зависання у повітрі, більш ефективну стабілізацію у повітрі, такі системи не забезпечують ефективного використання енергооснащення, відносно систем літакового типу. Це пояснюється тим, що підйомна сила в таких системах забезпечується виключно завдяки гвинтомоторній групі. В той час як у системах літакового типу підйомна сила забезпечується крилом, яке не споживає енергії від акумулятора.

Отже якщо в першу чергу пріоритет віддається саме великій дальності польоту БПЛА, то увагу слід звертати саме на конструкції літакового типу. А якщо потрібне зависання над якоюсь точкою, стабілізація для фотографування або фільмування – то кращим вибором буде квадрокоптер.

Розглянемо другий тип носія для побудови повітряного ретранслятора – аеростат. На рис. 3.5 наведена багаторазова ПВХ повітряна куля діаметром 2 м. Вага такого шару складає приблизно 2 кг.



Рисунок 3.5 – Гелієвий аеростат із тросами кріплення

Ємність такого шару 4,2 м<sup>3</sup> газу. Може бути використаний гелій або водень. Оскільки не вдалося знайти, яка може бути корисна підйомна вага, знайдемо підйомну силу ( $F_n$ ) такого аеростату, розрахуємо її – це буде різниця між силою Архімеда ( $F_A$ ) та силою тяжіння  $F_T$ , яка впливає на аеростат:

$$F_n = F_A - F_T. \quad (3.1)$$

Сила Архімеда може бути розраховується за формулою:

$$F_A = \rho_n \cdot g \cdot V_u, \quad (3.2)$$

де  $\rho_n$  – густина повітря, яка складає  $1.2754 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $V_u$  – об'єм шару.

Сила тяжіння розраховується за формулою:

$$F_T = g \cdot (\rho_z \cdot V_u + m_u), \quad (3.3)$$

- де  $\rho_z$  – густина гелію, яка складає  $0.178 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $m_u$  – маса шару.

$$F_n = g \cdot (V_u (\rho_n - \rho_z) - m_u) \quad (3.4)$$

$$F_n = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{4}{3} \pi (1,2754 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - 0,178 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}) - 2,6 \text{кг} \right) \quad (3.5)$$

$$F_n = 26 \text{Н}$$

Отже розраховане корисне навантаження у цьому випадку складає приблизно 2,6 кг.

Зведемо до табл. 4.1 отримані технічні характеристики для трьох носіїв, які потенційно можуть бути використані у якості повітряного ретранслятора.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики носіїв для розгортання повітряного ретранслятора

Параметри	DJI Matrice 200 V2	Volantex Ranger EX 757-3	Гелієвий аеростат в діаметрі 2м
Максимальний час знаходження у повітрі, хв	24-30	60+	7200-10000
Максимальне корисне навантаження	1870	500	2600
Час розгортання, хв	1-2	2-3	5-7
Вага пристрою, г	4270	1100	2000
Мобільність пересування в похідному стані	середня	мала	велика
Вартість, грн	250000	15000	3000
Складність керування	середня	висока	невелика

Виходячи з аналізу технічних характеристик носіїв можна зробити висновки:

- з точки зору часу роботи гелієвий аеростат є переважним, оскільки дозволяє підтримувати обладнання на заданій висоті протягом 5-7 днів. До того ж він має невелику вартість, значну простоту у використанні. До недоліків можна віднести той факт, що аеростат не може утримувати своє позиціонування, наприклад через сильний вітер;
- квадрокоптер через свій малий час роботи придатний тільки для оперативних короткотривалих сеансів зв'язку, до того ж він має велику вартість, але якщо він є в наявності як багатоцільовий пристрій (військові, рятувальники), то для його придбання взагалі не потрібно витрачати кошти;

- літак з точки зору часу польоту займає проміжний стан, між квадрокоптером і аеростатом, до недоліків такого варіанту можна віднести те, що літак має мати режим баражування по колу в межах району розташування повітряного ретранслятора; більш складний в управлінні, потребує злітної смуги; розташувати обладнання складно через необхідність збереження аеродинамічних характеристик борту; до переваги можна віднести можливість дистанційного розташування ретранслятора на великій відстані від точки запуску.

Таким чином кожен із представлених типів пристроїв має свої переваги і недоліки і є незамінним для конкретних реалізацій в залежності від поставленої задачі.

## 4 РОЗРОБКА ВУЗЛУ РЕТРАНСЛЯЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ РАДІОСТАНЦІЙ

### 4.1 Технічне завдання

Вихідні умови:

- забезпечити зв'язком мобільних абонентів, які знаходяться на відстані 35 км, у якості обладнання використовують портативні радіостанції;
- місцевість рівнинна без перешкод;
- зв'язок необхідний протягом декількох 3-5 днів;
- максимальна віддаленість абонентів може збільшуватись до 50-60 км;
- радіостанції мають бути малогабаритними та легкими;
- діапазон використовуваних частот має бути безліцензійним.

Враховуючи такий тривалий термін роботи ретранслятора, у якості носія будемо використовувати аеростат.

### 4.2 Вибір радіоприймального та радіопередавального обладнання

Виходячи з аналізу безліцензійних стандартів, який був проведений в підрозд.1.2, можна зробити висновок, що для задовільнення умов технічного завдання необхідно використовувати стандарти LPD433 або PMR446, так як СВ не задовольняє малогабаритності та ефективності антенних систем.

Частоти діапазону 27 МГц суттєво менше згасають із розповсюдженням в реальних умовах ніж 433 МГц та 446 МГц, що має давати більшу відстань зв'язку. Але враховуючи малу ефективність антенних систем портативних радіостанцій і великий рівень завад – на практиці отримуємо зворотній результат. Тому зусередимося на УКХ стандартах.

Якщо обирати між стандартами LPD433 та PMR446. То перевагу має останній, оскільки він має в 50 разів більшу потужність (0.5 Вт відносно

10мВт). Що звісно дозволить забезпечити більшу дальність та якість зв'язку за тих же самих умов.

До того ж обрання серед цих двох діапазонів у деякому плані є відносним – оскільки більшість УКХ радіостанцій підтримують обидва цих діапазони.

Розглянемо декілька портативних радіостанцій, які можуть бути використані. До розгляду будуть прийняті дві радіостанції різних виробників, а саме WOUXUN та Baofeng.

WOUXUN KG-UV6D рис.(4.1), ця радіостанція володіє одним із кращих приймачів у своєму класі завдяки класичній супергетеродинній схемі. Тому ця станція може використовуватися навіть як базова або автомобільна, із повно розмірними, або спрямованими антенами. Це можливо завдяки високим показникам вибіркості та динамічного діапазону.



Рисунок 4.1 – Мобільна радіостанція WOUXUN KG-UV6D

Рація має дисплей і клавіатуру, що дозволяє швидко і не вдаючись до стороннього обладнання змінювати всі необхідні параметри. Передавач цієї рації розвиває потужність 5Вт на діапазоні 145МГц і 4Вт на 430МГц, в комплекті йде якісна дводіпазонна антена. Радіостанція дозволяє підключити різні гарнітури з Kenwood роз'ємом.



Рисунок 4.4 – Мобільна радіостанція Baofeng UV-5R

Рація Baofeng UV-5R зображена на рис.4.2. Рація також працює в двох діапазонах. Охоплюваний діапазон частот дозволяє працювати з будь-якими LPD і PMR абонентами на частотах 136-174МГц і 400-480МГц. Рація має регульовану потужність 1 і 5 Вт. Доступні такі опції: PTT ID, VOX, тайм-аут таймер, звукове сповіщення при розряді, аварійна сигналізація, блокування зайнятого каналу. Рація може програмуватися з комп'ютера через USB програматор.

До недоліків цієї станції слід віднести її реалізацію за допомогою RDA-чипа. З одного боку це суттєво дозволяє здешевити виробництво, а з іншого боку це вплинуло на якісні показники радіоприйому як динамічний діапазон та вибірковість за сусідніми каналами. Це погіршує зв'язок в умовах великої завантаженості ефіру, особливо в міських умовах сучасного міста з багатьма джерелами випромінювання. Це ускладнює використання повнорозмірних антен для цієї моделі.

Детальні характеристики розглянутих радіостанцій наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Загальні характеристики мобільних радіостанцій WOUXUN KG-UV6D та Baofeng UV-5R.

Технічні характеристики	WOUXUN KG-UV6D	Baofeng UV-5R
Частотний діапазон	136 - 174 МГц (VHF), 400 - 470 МГц (UHF).	136 - 174 МГц (VHF); 400 - 480 МГц (UHF).
Сітка частот, крок	5, 6.25, 10, 12.5, 25, 50, 100 кГц.	2.5, 5, 6.25, 10, 12.5, 25 кГц.
Вихідна потужність	1 або 5 Ватт.	1 або 5 Ватт.
Опір антени	50 $\Omega$	50 $\Omega$
Чутливість приймача (При 12 дБ відношенні сигнал/шум)	0,16 мкВ	0,12 мкВ
Герметичність	захист від пилу і вологи за стандартом IP55	захист від пилу і вологи за стандартом IP55
Габарити	65 x 118 x 39 мм	58 x 130 x 32 мм
Вага	255 г	206 г
Кодування	DTMF (двотональний багаточастотний аналоговий сигнал)	DTMF (двотональний багаточастотний аналоговий сигнал)
Ціна	100 Доларів США	35 Доларів США

Як видно з табл. (4.1) мобільні радіостанції WOUXUN KG-UV6D та Baofeng UV-5R, мають приблизно однакові технічні характеристики, але у Baofeng UV-5R значно нижча ціна, і менша вага станції. Саме тому будемо використовувати цю модель.

### 4.3 Вибір типу антен та устаткування вузла ретрансляції

Для реалізації вузлу ретрансляції пропонується використання достатньо дешевого і простого у використанні блоку для організації активної ретрансляції, який зображений на рис. 4.5.



Рисунок 4.5 – Блок ретранслятору

Розглянемо більше детально, як працює такий пристрій. Організація його підключення зображена на рис.4.6.

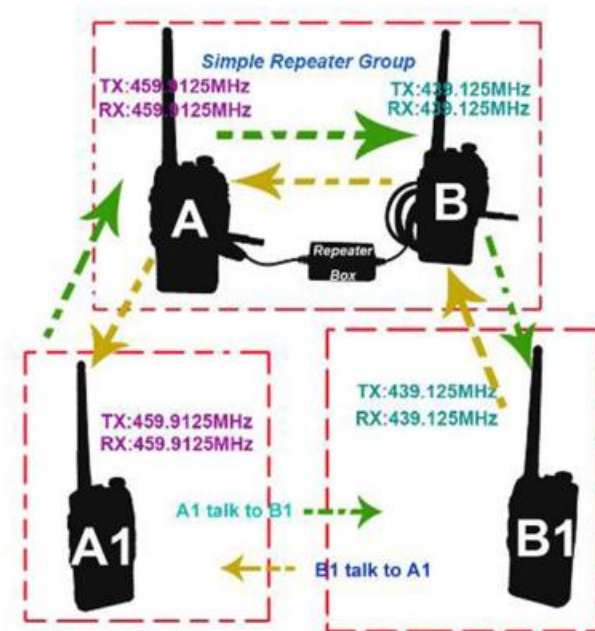


Рисунок 4.6 – Принцип роботи ретранслятора

Як можна побачити, то для реалізації вузла ретрансляції блок ретранслятору підключається до двох портативних радіостанцій, які використовуються як прийомо-передавальне обладнання ретранслятора. Підключення виконується за допомогою kenwood роз'єму.

Тобто цей блок забезпечує взаємний обмін між радіостанціями сигналів які від одного абонента до іншого в той чи інший бік. Поки одна станція приймає сигнал, ретранслювати далі іншою. Відбувається це завдяки приходу сигналу на мікрофонні входи від виходів динаміків станцій одне одного, а далі спрацьовує VOX система, яка активує режим передачі.

Кожна із радіостанцій налаштована на свою частоту прийому і передачі. Між станціями ретранслятора виконаний рознос частот, для того щоб ретранслятор не чув сам себе.

Технічні характеристики приймача та передавача цього ретранслятора залежать від підключених до нього мобільних радіостанцій, у запропонованому варіанті його технічні характеристики відповідні до радіостанції Baofeng UV-5R. Слід також зазначити, що для його стабільної роботи дуплексне рознесення повинно складати не менше ніж 5 МГц. Ціна такого блока ретранслятора складає приблизно 10 доларів США.

У якості антенного устаткування пропонується використовувати штатні антени радіостанцій як достатньо ефективні та які мають доволі рівномірну діаграму спрямованості, що особливо актуально для використання на ретрансляторі, так як заздалегідь неможливо визначити напрямок на абонентів, які постійно переміщуються.

#### 4.4 Розрахункова частина

Під час розташування вузла ретрансляції можливі два крайні варіанти:

- вузол ретрансляції розташований у безпосередній близькості із одним із абонентів (над абонентом); цей варіант є найзручнішим з точки зору

розгортання, але найменшим за відстанню, на якій можливий стійкий зв'язок за інших однакових умов, зокрема висоти підвісу ретранслятора; цей варіант можна інтерпретувати як збільшення висоти підвісу антени одного з абонентів із збереженням рівня вихідної потужності в точці випромінювання

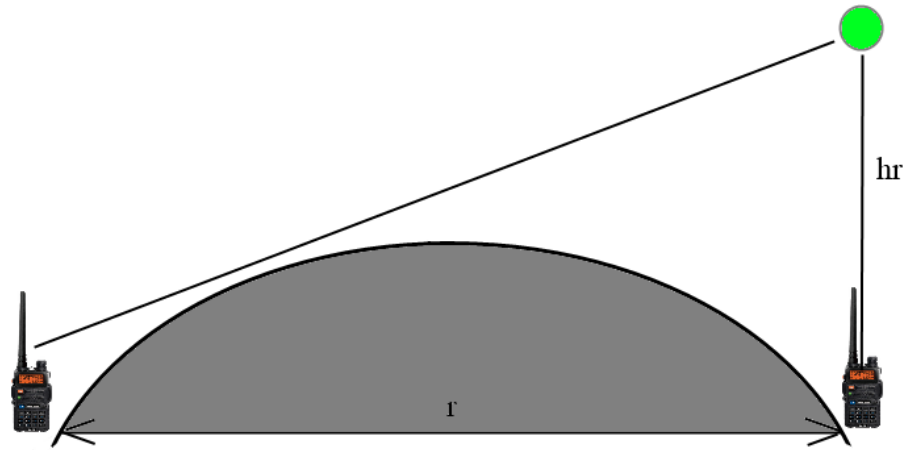


Рисунок 4.7 – Розміщення ретранслятору над одним з абонентів

- вузол ретрансляції знаходиться посередині між двома абонентами; цей варіант є найбільшим за дальністю зв'язку, але більш складним з точки зору оперативного розгортання і згорання повітряного ретранслятора.

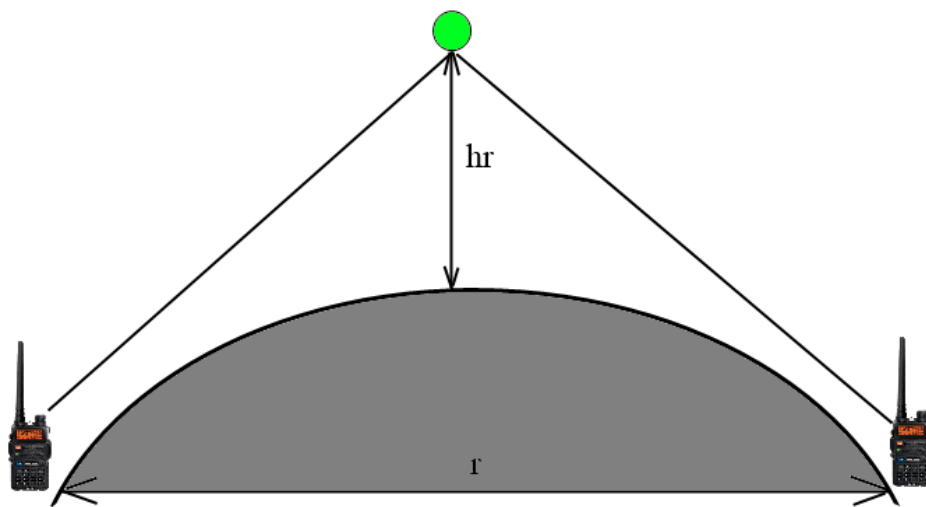


Рисунок 4.8 – Розміщення посередині між абонентами

Розглянемо запропоновану методику розрахунку висоти підвісу ретранслятора в залежності від варіантів розташування повітряного ретранслятора. Під час розрахунків слід враховувати таку послідовність дій

1) Необхідно провести розрахунок втрат під час розповсюдження радіохвиль в реальних умовах і виходячи з цього визначити максимальну відстань, на якій буде допустимий мінімальний рівень сигналу в точці прийому. Ця максимальна відстань прийматиметься за відстань прямої видимості, яку необхідно забезпечити.

2) Враховуючи висоту розташування антени одного із абонентів розраховуємо необхідну висоту підвісу повітряного ретранслятора.

Проведемо розрахунок максимально допустимих втрат сигналу під час розповсюдження радіохвиль в реальних умовах, при цьому приймемо потужність передавача 1 Вт, чутливість приймача 0,12 мкВ за формулою (2.1). Для цього переведемо у Вт чутливість приймача:

$$P_c = \frac{U^2}{R_{вх}}; \quad . \quad (4.1)$$

$$P_c = \frac{(1,2 \cdot 10^{-7} \text{ В})^2}{50 \text{ Ом}} = 2,88 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} . \quad (4.2)$$

Тоді втрати складатимуть:

$$A = \frac{1 \text{ Вт}}{2,88 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}} = 3,472 \cdot 10^{15} . \quad (4.3)$$

З отриманої величини втрат знайдемо відстань на якій сигнал буде мінімально допустимий для роботи приймача. Для цього з формули (2.19) виразимо відстань  $r$ , з врахуванням того факту, що ККД фідерів дорівнюють 1

(так як вони відсутні і підключення антен відбувається напряму до пристроїв); нехай підсилення антен дорівнює 1, втрати при розповсюдженні  $\nu = 0,01$ .

Тоді:

$$r = \sqrt{\frac{A \cdot \left(\frac{c}{f}\right)^2 \cdot \nu^2}{16\pi^2}}; \quad (4.4)$$

$$r = \sqrt{\frac{3,472 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^8}{4,46 \cdot 10^8}\right)^2 \cdot 0,01^2}{16 \cdot 3,14^2}} = 3,154 \cdot 10^4 \text{ м}. \quad (4.5)$$

Отже з такими показниками чутливості і потужності передавача зв'язок потенційно можливий на відстані в 31,54 км, за умови прямої видимості. Враховуючи той факт, що відстань між абонентами складає 35 км, то варіант із розміщенням ретранслятора над одним із абонентів не вирішить поставленої задачі. Тому розмістимо ретранслятор посередині між двома абонентами і розрахуємо необхідну висоту підвісу, виходячи з отриманої потенційно досяжної відстані. Для цього з формули 2.24 виразимо висоту підвісу ретранслятора, враховуючи, що висота розташування антени портативної радіостанції  $h_a = 1,5 \text{ м}$ :

$$h_r = \left(\frac{r - \sqrt{h_a}}{4,12 \cdot 10^3}\right); \quad (4.6)$$

$$h_r = \left(\frac{31,54 \text{ км} - \sqrt{1,5 \text{ м}}}{4,12 \cdot 10^3}\right) \approx 42 \text{ м}. \quad (4.7)$$

Якщо розмістити ретранслятор на висоті 42 м посередині відстані між двома абонентами, то ми отримаємо пряму видимість в обидва боки по 31,5 км, таким чином результуюча відстань між абонентами може збільшуватися до приблизно до 63 км.

Отриманий результат цілком задовільняє технічному завданню. Якщо буде потреба збільшення радіуса покриття, або покращення завадозахищеності, то можна підвищити потужність портативних радіостанцій і ретранслятора до 5 Вт. За тією ж самою методикою розрахунків, яка наведена у (4.1-4.7)., отримуємо максимально допустиму відстань за бюджетом радіолінії від портативної радіостанції до ретранслятора у 70,5 км, при цьому висота розташування повітряного ретранслятора має бути 252 м, результуюча максимальна відстань між абонентами може бути приблизно 141 км.

Результати розрахунків зведені до табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики системи радіозв'язку із використанням повітряного ретранслятора

Потужність передавачів	Дальність зв'язку ПРС-ПРС ( $h_a = 1,5\text{м}$ )	Дальність зв'язку ПРС-ПРС із використанням ретранслятора	Необхідна висота підйому ретранслятора для забезпечення прямої видимості
1 Вт	10 км	63 км	42 м
5 Вт	10 км	141 км	252 м

Вага приймально-передавального обладнання, до складу якого входить дві радіостанції Baofeng UV-5R, блок ретрансляції, що з'єднує станції - складає орієнтовно 500 г. Якщо у цьому випадку використовується аеростат із вантажопід'ємністю в 2,6 кг, то резерв у 2 кг може бути використаний, наприклад для оснащення апаратури додатковими елементами живлення.

Завдяки цьому можна збільшити безперервний час функціонування ретранслятора без додаткової технічної паузи на зміну елементів живлення. І таким чином довести його майже, до часу можливого знаходження аеростату у повітрі (5-7 діб).

## ВИСНОВКИ

В роботі проведений аналіз безліцензійних стандартів радіозв'язку для використання у якості альтернативи класичним стільниковим мережам для заданих потреб. Це набуває актуальності там, де стільниковий зв'язок відсутній за тихчи інших обставин. Вимогам зручності та мобільності зв'язку відповідають стандарти, які працюють на УКХ.

Основною проблемою використання таких засобів є відносно мала дальність зв'язку між абонентами, що обмежується відстанню прямої видимості і є характерним для діапазону ультракоротких хвиль. Ця відстань для портативних станцій складає до 10 км на відкритій місцевості.

Шляхом подолання цього недоліку – є можливість використання принципів ретрансляції радіосигналів. В роботі розглянуті засоби розгортання повітряних ретрансляторів, як ефективного швидкого рішення організації зв'язку на великі відстані.

Для вирішення поставленого технічного завдання, було обране наступне обладнання: у якості носія ретранслятору – гелієвий аеростат; у якості приймально-передавального обладнання дві портативні радіостанції Baofeng UV-5R. За допомогою цього обладнання та проведених розрахунків теоретично вдалося збільшити дальність зв'язку до 141 км, при висоті підвісу аеростата 252 м, потужність передавачів при цьому складала 5 Вт, частота передачі 446 МГц. Строк неперервної роботи ретранслятора 5-7 діб, в залежності від комплектування радіостанцій акумуляторами. Таким чином висунуті вимоги технічного завдання виконані.

Методика розрахунку параметрів підвісу ретранслятора може бути використана під час вирішення подібних задач для розгортання мережі мобільних портативних радіостанцій на місцевості.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ємельянов В.В., Свид І.В. Системи стільникового рухомого радіозв'язку. Харків. 2010, 283 с.
2. Щербаков В. Си-Би радиосвязь для всех. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.
3. Что нужно знать о Си-Би связи: сайт URL: <https://radioscan.com.ua/a280598-chto-nuzhno-znat.html>
4. LPD433: сайт URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/LPD433>
5. PMR446: сайт URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/PMR446>
6. Безрук В. М., Певцов Г. В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. Харьков: Коллегиум, 2007. 430 с.
7. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Горячая линия – Телеком, 2007
8. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. Учебное пособие для радиотехнических специальностей ВУЗов. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1975
9. Радиорелейные и спутниковые системы передачи. Учебник для ВУЗов / А.С. Немировский, О.С. Данилович, Ю.И. Маримонт та др. Под ред. А.С. Немировского. М.: Радио и связь, 1986
10. Ємельянов В.В. Коспект лекції Ч.1 з дисципліни «Системи мобільного зв'язку». Харків, 2016. 176с.
11. Принцип дії ретрансляторів : сайт URL: <https://ukrbukva.net/115449-Sistema-iz-dvuh-antenn-obrazuyushih-passivnyiy-retranslyator-signalov.html>.
12. БПЛА длительного полета с солнечными элементами: сайт URL: [https://sites.google.com/site/webstm32/bpla\\_solar?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1](https://sites.google.com/site/webstm32/bpla_solar?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1)
13. Рекомендації до оформлення кваліфікаційної роботи: сайт URL: [https://cn.nure.ua/wp-content/uploads/2021/05/129-test\\_compressed.pdf](https://cn.nure.ua/wp-content/uploads/2021/05/129-test_compressed.pdf)