

Міністерство освіти та науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет ІМІ  
(повна назва)

Кафедра інформаційно-мережної інженерії  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Підвищення ефективності системи відеозв'язку із БПЛА  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІм-22-3

Світличний А.О.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та  
радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Інформаційно  
мережна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ІМІ Іваненко С.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Безрук В.М.  
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Не містить відомостей, заборонених  
до відкритого публікування

Керівник \_\_\_\_\_ /*С.А. Іваненко*

Студент \_\_\_\_\_ / *А.О. Світличний*

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Інфокомунікацій \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ інформаційно-мережної інженерії \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 172 Телекомунікації та радіотехніка \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-наукова \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Інформаційно мережна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту \_\_\_\_\_ Світличному Андрію Олександровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Підвищення ефективності системи відеозв'язку із БПЛА»  
затверджені наказом ВНЗ від "18" 03 2024 р. № 232 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 21.06.2023

3. Вихідні дані до роботи Розглянути загальні характеристики та класифікацію систем управління сучасними БПЛА, розробити математично обґрунтований спосіб обчислення дистанції зв'язку використовуючи відомі моделі розповсюдження радіохвиль. Запропонувати та розробити спосіб підвищення ефективності системи відеозв'язку із БПЛА..

4. Перелік запитань, що необхідно опрацювати в роботі

1) Аналіз галузей застосування БПЛА та проблеми їх експлуатації

2) Аналіз особливостей каналів зв'язку з БПЛА.

3) Аналіз варіантів збільшення відстані управління БПЛА

4) Аналіз варіантів збільшення відстані управління БПЛА

5) Практична реалізація оптимізованої системи передачі відеозображення 5.8 ГГц

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п. 5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Слайди у форматі Power Point (назва та мета роботи, актуальність роботи, канали управління БПЛА, моделі розповсюдження радіохвиль, відстань зв'язку, обмеження дальності зв'язку, підвищення ефективності відеоканалу, оцінка результатів роботи, висновки).

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	18.03.24	
2	Підбір літератури за темою роботи.	30.03.23	
3	Виконання розділу 1	10.04.23	
4	Виконання розділу 2	15.04.23	
5	Виконання розділу 3	15.05.23	
6	Виконання розділу 4	18.05.23	
7	Оформлення презентаційного матеріалу	25.05.23	
8	Підготовка до захисту ЕК.	20.06.23	

Дата видачі завдання 18 03 2024 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. каф. ІМІ Іваненко С.А.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 64 с., 15 рис., 11 табл., 24 формул, 21 джерело, 2 додатки

*Об'єкт роботи* – аналоговий відеоканал зв'язку із БПЛА.

*Мета роботи* – Підвищення ефективності системи відеозв'язку із БПЛА шляхом використання виносного відеоприймача.

В кваліфікаційній роботі проведений аналіз факторів, які обмежують широке застосування БПЛА, визначено, що основні фактори обмеження – мала дистанція зв'язку саме відеоканалу. Для оцінки потенційно досяжної відстані для різних каналів зв'язку і варіантів обладнання були використані моделі розповсюдження радіохвиль Окамура-Хата та та COST-231 Хата. Була виведена формула для оцінки потенційної відстані зв'язку. Побудовані залежності наочно показують залежності дистанції зв'язку для різного типу обладнання і як вони співвідносяться із відстанню прямої видимості.

В роботі запропоновано варіант підвищення ефективності каналу відеозв'язку на частоті 5.8 ГГц із використанням виносного радіоприймача, який дозволяє підвищити дистанцію зв'язку при тих же самих параметрах обладнання. Отримані результати досліджень показали, що дистанція зв'язку може бути підвищена приблизно втричі, відносно варіанту без його використання.

FPV, БПЛА, 5.8 ГГц, SKYZONE, МАТЕК, ПІДСИЛЕННЯ СИГНАЛУ, АНАЛОГОВИЙ ВІДЕОКАНАЛ.

## THE ABSTRACT

Explanatory note: 64 p., 15 fig., 11 tabl., 24 form., 21 sources, 2 ap.

The object of the work is an analog video channel of communication with the UAV.

The purpose of the work is – an increasing the efficiency of the video communication system with the UAV by using a remote video receiver.

In the qualification work, an analysis of the factors that limit the wide use of UAVs was carried out, and it was determined that the main limiting factors are the short communication distance of the video channel itself. To estimate the potentially achievable distance for various communication channels and equipment options, the Okamura-Hata and COST-231 Hata radio wave propagation models were used. A formula for estimating the potential bond distance was derived. Plotted relationships visually show communication distance relationships for different types of equipment and how they relate to line-of-sight distance.

The paper proposes an option for increasing the efficiency of the video communication channel at a frequency of 5.8 GHz using a remote radio receiver, which allows you to increase the communication distance with the same equipment parameters. The obtained research results showed that the communication distance can be increased by approximately three times, compared to the option without its use.

FPV, UAV, 5.8 GHz, SKYZONE, MATEK, SIGNAL AMPLIFIER, ANALOG VIDEO CHANNEL.

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	9
ВСТУП .....	10
1 АНАЛІЗ ГАЛУЗЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ТА ПРОБЛЕМИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ. ....	11
1.1 Сфери застосування БПЛА .....	11
1.2 Проблеми експлуатації БПЛА .....	12
2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ З БПЛА .....	13
2.1 Огляд каналів управління для FPV БПЛА.....	13
2.2 Аналіз каналу управління БПЛА .....	14
2.3 Аналіз відеоканалу FPV БПЛА та особливості стандартів відеосигналу .....	15
2.4 Особливості розповсюдження радіохвиль на УКХ .....	19
2.5 Моделі розповсюдження радіохвиль.....	22
3 АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ВІДСТАНІ УПРАВЛІННЯ БПЛА .....	27
3.1 Аналіз залежності втрат сигналу при розповсюдженні від висоти підвісу антени оператора.....	27
3.2 Оцінка факторів реального обмеження дистанції зв'язку.....	31
3.3 Варіант оптимізація відеоканалу для збільшення дистанції зв'язку. ....	38
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯ 5.8 ГГц .....	41
4.1 Вибір виносного радіоприймача 5.8 ГГц.....	41
4.2. Обчислення отриманих результатів .....	43
4.3 Загальна оцінка ефективності запропонованого рішення. ....	45
ВИСНОВКИ .....	47
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	49
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ .....	52
ДОДАТОК Б ТЕЗИ КОНФЕРЕНЦІЇ.....	62

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

**БПЛА** – безпілотний літальний апарат;

**FPV (First Person View)** – вид від першого лиця;

**ELRS (Express Long Range System)** – система зв'язку великої відстані;

**LQ (Link Quality)** – частове розділення каналів;

**УКХ** – ультракороткі хвилі;



## ВСТУП

Безпілотні літальні апарати стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя. Можливості нової технології вражають: дрони можуть виконувати картографування, пошукові операції, доставку вантажів, оборонні задачі. Дана технологія має велике майбутнє в багатьох галузях людської діяльності, але вона має цілком конкретні технічні обмеження, які обмежують її застосування у певних випадках.

Оскільки БПЛА здебільшого керуються бездротовими технологіями, то один з основних недоліків, який виникає під час їх користування – обмеженість дистанції управління, яка може бути ключовою проблемою, якщо питання часу автономного живлення вирішене.

В першу чергу ця проблема пояснюється діапазонами частот, які використовуються в каналах зв'язку з БПЛА. Здебільшого це ультракороткохвильовий діапазон частот, який характерний тим, що його хвилі можуть розповсюджуватися тільки в межах прямої видимості і фактично не проявляють властивостей огинання земної поверхні під час розповсюдження.

В роботі проводяться дослідження щодо факторів обмеженості дистанції зв'язку із БПЛА. Для пошуку відповіді на це питання, пропонується використання математичної моделі розповсюдження радіохвиль. Прогнозовано, що основним фактором обмеження буде саме відеоканал зв'язку із БПЛА, в силу частотних особливостей каналу.

В роботі пропонується вихід із даної ситуації, який може полягати у використанні виносного приймача, який дозволить вирішити дану проблему, з метою підвищення результуючої дистанції роботи з БПЛА.

Дослідження, які проводяться в роботі мають теоретичне обґрунтування, а запропоновані рішення використовують конкретне технічне устаткування.

# 1 АНАЛІЗ СФЕР ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ТА ПРОБЛЕМИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

## 1.1 Сфери застосування БПЛА

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) знаходять широке застосування у різних сферах людської діяльності, перелічимо основні з них нижче.

1. Туризм та розваги: компанії використовують БПЛА для організації екскурсій, аерофотозйомки для туристичних агентств або навіть для зйомки фільмів і відеороликів.

2. Цивільна авіація: вони можуть бути використані для моніторингу лісів, контролю над морськими ділянками, аерофотозйомки для картографування та зйомки відео для рекламних цілей.

3. Медична сфера: БПЛА можуть доставляти медичне обладнання, кров та інші медичні матеріали на важкодоступні території або в умовах надзвичайних ситуацій.

4. Сільське господарство: Вони можуть використовуватися для моніторингу стану сільськогосподарських культур, оцінки врожаю та навіть для розпилення добрив або засобів захисту рослин.

5. Доставка вантажів: БПЛА використовуються для доставки товарів на короткі відстані, що дозволяє швидко та ефективно доставляти малий товар до місць призначення.

6. Пожежна безпека: вони можуть використовуватися для моніторингу та виявлення пожеж, а також для координації дій пожежних відділень.

7. Пошук і рятування: БПЛА можуть бути використані для пошуку втрачених або потерпілих осіб в умовах катастроф або надзвичайних ситуацій.

8. Наукові дослідження: вони дозволяють вченим проводити дослідження в недоступних або небезпечних областях, таких як вулканичні кратери чи глибини океану.

9. Моніторинг довкілля: БПЛА можуть бути використані для виявлення забруднень довкілля, моніторингу рівня забруднення повітря та води, а також для контролю за викидами парникових газів.

10. Військове застосування: БПЛА використовуються для здійснення розвідки, ведення спостережень, виявлення цілей, а також для атаки на ворожі позиції.

Зараз в Україні важко переоцінити роль БПЛА для вирішення задач як в цивільному так і військовому застосуванні. Вони активно використовуються як для пошуково-рятувальних операцій так і охорони державного кордону.

## 1.2 Проблеми експлуатації БПЛА

Хоча БПЛА мають численні переваги, такі як збільшення безпеки для операторів, здатність працювати в умовах, небезпечних для людей, і зниження витрат, є й деякі недоліки в їх використанні які знижують якість і ефективність їх експлуатації, до них можна віднести наступні:

1. Обмеження щодо часу польоту: Більшість БПЛА мають обмежену тривалість польоту через обмежену ємність батарей або пального, що обмежує їхню ефективність для довгих місій.

2. БПЛА потребують надійних технологій для навігації та комунікації, і в разі їхнього збою можуть виникнути проблеми з керуванням та безпекою.

3. Обмеженість дистанції управління через особливості розповсюдження радіохвиль тих діапазонів, які зазвичай використовуються для управління БПЛА.

Якщо перший та другий недолік можуть бути вирішені використанням у літакових систем та інерціальними системами або глобального позиціонування відповідно, то вирішення обмеженості дистанції вимагає дещо складніших підходів.

В цій роботі приділяється увага вирішенню проблеми збільшення дистанції управління БПЛА.

## 2 АНАЛІЗ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БПЛА

### 2.1 Огляд каналів управління для FPV БПЛА

Між оператором та БПЛА існує два основних канали зв'язку. Вони зображені на рис. 2.1.

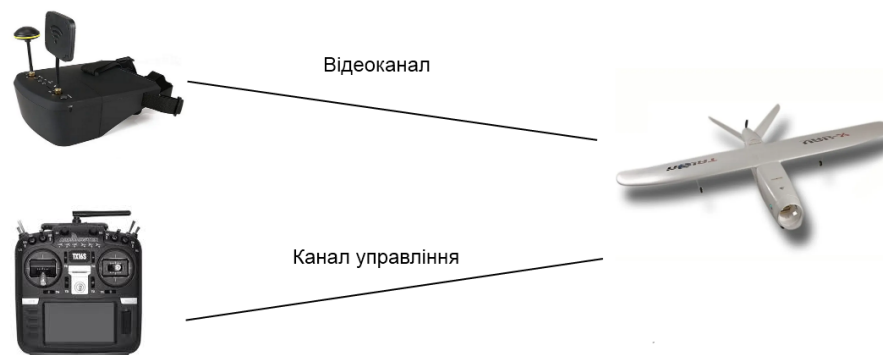


Рисунок 2.1 – Ілюстрація каналів зв'язку між оператором і БПЛА

Канал управління необхідний для того, щоб передавати сигнали управління від пульта оператора на БПЛА.

Сигнали управління БПЛА зазвичай включають в себе різні типи команд, що дозволяють контролерам або автономному програмному забезпеченню керувати рухом та функціонуванням БПЛА. Канал управління необхідний для передачі наступних команд:

1. Команди керування політною діяльністю: такі команди включають в себе керування швидкістю, напрямом та висотою польоту, а також зміни курсу руху БПЛА.

2. Команди для керування камерами, сенсорами або виконувальними пристроями (актуаторами), які можуть бути направлені або активовані для збору конкретної інформації та для виконання певних функцій.

3. Команди безпеки і аварійного приземлення-повернення: такі команди включають в себе дії для аварійного приземлення, відновлення зв'язку або повернення додому до точки зльоту.

4. Команди маршрутизації: Якщо БПЛА має виконувати певну місію або слідувати певному маршруту, можуть передаватися команди щодо визначення цього маршруту.

5. Команди взаємодії з іншими БПЛА або системами. У складних системах типу «рій» з БПЛА можуть передаватися команди взаємодії між декількома БПЛА або іншими системами.

## 2.2 Аналіз каналу управління БПЛА

Сигнали управління можуть передаватися через радіо, супутниковий зв'язок або інші засоби зв'язку, залежно від типу та місії БПЛА. В роботі будемо розглядати саме прямий канал управління «оператор-БПЛА».

Для організації такого зв'язку існує низка систем управління від таких популярних виробників: FrSky, TBS Crossfire, ELRS та інші [1,2,3]. Порівняльна характеристика технічних параметрів таких систем наведена у табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики систем управління БПЛА

Система	TBS Crossfire	ELRS	FrSky
Діапазон робочих частот, МГц	868, 915	915, 2400	915, 2400
Потужність передавача, Вт	0,025-2	0,025-1	0,5-1
Чутливість приймача, dBm	-130	-148 (915 МГц) - 132 (2,4 ГГц)	-105

Як бачимо більшість систем використовують частоту 900 МГц як універсальне рішення, яке поєднує відносно високу дальність зв'язку із невисоким рівнем завантаженості діапазону.

Особливої уваги заслуговують продукція фірми TBS Crossfire.

Crossfire (CRSF) – це радіопротокол передачі даних, розроблений компанією TBS (Team BlackSheep). Він є високопродуктивним та добре зарекомендованим рішенням для якісного радіоуправління, яке набуло великої популярності у спільноті FPV дронів [3].

Ключові характеристики та особливості системи Crossfire:

- Велика дальність: є можливість підтримувати стабільне з'єднання на значних відстанях, часто більше кількох кілометрів.

- Низький рівень затримки сигналу: даний протокол забезпечує швидке оновлення даних з мінімальною затримкою, що є критичним для FPV польотів.

- Підтримка функції LQ (якості зв'язку): це дозволяє користувачам проводити моніторинг якості зв'язку в режимі реального часу, що є важливим показником стабільності з'єднання.

- Адаптивна швидкість передачі: це дозволяє автоматично налаштовувати швидкість передачі даних в залежності від умов, забезпечуючи оптимальний співвідношення між швидкістю та дальністю.

- Інтегровані телеметричні функції: передавач та приймач підтримують двосторонній зв'язок за допомогою каналу телеметрії. Таким чином користувачі можуть отримувати різноманітну інформацію від своїх літальних апаратів безпосередньо на свої передавачі за допомогою протоколу Crossfire.

- Сумісність: Пристрої Crossfire, такі як модулі передачі та приймачі, можуть бути інтегровані з багатьма популярними пультами управління, зокрема, як працюють під OPEN TX..

- Наявність різних формфакторів обладнання, доступні як мікро- так і нано-приймачі: Це дуже зручно для користувачів, яким потрібен компактний розмір або низька вага.

Таким чином, як показують результати аналізу, переважна більшість систем управління FPV-БПЛА працює в діапазоні частот 800-2.4 ГГц.

### 2.3 Аналіз відеоканалу FPV БПЛА

Для передачі відеозображення в FPV БПЛА використовуються різні частотні діапазони УКХ.

До елементів системи передачі відеозображення відносяться: камера, відеопередавач та приймач відеозображення із екраном у вигляді FPV-окулярів або монітора. Передача сигналу відбувається як у цифровому так і в аналоговому форматі.

Цифрові системи здебільшого використовуються для отримання високоякісного зображення із високою роздільною здатністю та можливістю збереження даних безпосередньо у цифровому форматі. Зокрема, серед всіх інших виділяється система відеозв'язку DJI FPV. Вона має малу затримку відносно відомих інших цифрових систем і цілком може застосовуватися для швидкісного управління об'єктами. Система складається із відеошолома та модуля, який встановлюється на БПЛА. (рис. 2.2.) Її технічні характеристики наведені у табл.2.2



Рисунок 2.2 – Система відеозв'язку DJI FPV.

Аналогові системи відеозв'язку історично з'явилися першими і використовують стандарти PAL та SECAM.

PAL (Phase Alternating Line) – це система кольорового телебачення, яка використовується у телевізійному мовленні. PAL була розроблена в Німеччині та стала широко використовуваною в Європі, Азії, Африці та інших регіонах. Вона використовує 625 рядків розгортки та частоту оновлення 50 Гц. PAL використовує фазовий перехід на кожному рядку зображення, щоб компенсувати можливі фазові спотворення, які спричинені шумами, і дозволяє отримати стійке кольорове зображення. Система PAL є однією з основних кольорових систем у світі, поряд з NTSC (National Television System Committee) і SECAM [5].

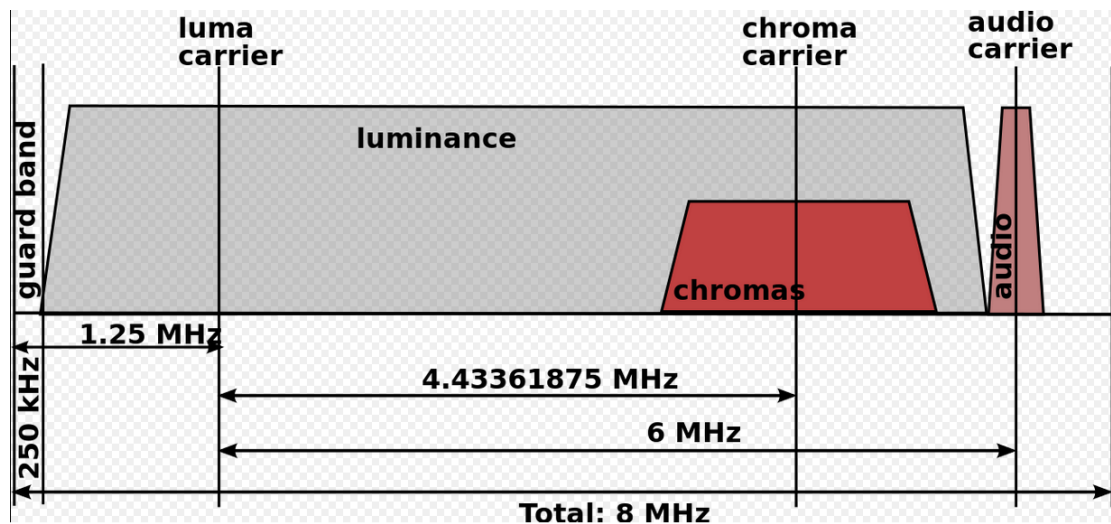


Рисунок 2.3 – Структура спектру аналогового сигналу стандарту PAL

SECAM (Séquentiel couleur à mémoire) - це інша система кольорового телебачення, яка використовується у деяких країнах, переважно в Європі та колишніх французьких колоніях. SECAM також був розроблений у Франції. Ця система відрізняється від інших, таких як PAL і NTSC, оскільки вона використовує послідовне кольорове відтворення з кольоровими сигналами, що вимірюються на кожній стрічці зображення. Це означає, що кожний рядок містить інформацію про кольори. SECAM має кілька варіантів, таких як SECAM-L (використовується в Західній Європі), SECAM-B/G (використовується в Болгарії, Франції, Польщі та ін.), SECAM-D/K (використовується в Росії, та пострадянських країнах та ін.). У порівнянні з PAL і NTSC, SECAM не так широко використовується, але все ще знаходить своє застосування в деяких регіонах світу.



Аналогові системи відеозв'язку займають своє стійке місце у використанні для FPV по теперішній час завдяки своїм двом основним перевагам: мала затримка сигналу і поступове погіршення якості сигналу на відміну від цифрових, які втрачають сигнал майже раптово, що призводить до великої ймовірності втрати борту.

Основні виробники аналогового FPV обладнання: МАТЕК, SKYZONE, АКК та інші. Слід розуміти, що завдяки тому, що передавачі і приймачі сигналу, так само як і відеокамери підтримують одночасно як PAL так і NTSC, то обладнання різних виробників можна об'єднувати між собою без проблем у різних комбінація. Це ще одна перевага такого типу обладнання над цифровим, де передавачі і приймачі як правило працюють тільки у зв'язці одна система одного виробника. В якості недоліків можна відмітити необхідність додаткового пристрою для запису

В табл. 2.2 Основні характеристики FPV відеосистем.

Система	DJI FPV	АКК FX2 ULTIMATE MINI	Matek VRX/VTX- 1G3-V2
Діапазон робочих частот, ГГц	2.4, 5.8	5.8	1.2
Потужність передавача, dBm	FCC: $\leq 31$ .	30	29
Чутливість приймача, dBm	—	$-90 \pm 1$	-95
Затримка сигналу, мс	30-40	15-20	15-20
Смуга відеоканалу, МГц	40	8	8

Як можна побачити із цього розділу переважна кількість каналів зв'язку із БПЛА, як відео так і управління працюють в УКХ діапазоні, в межах від 800 до

5800 МГц. Для кращого розуміння особливостей розповсюдження радіохвиль цього діапазону проводиться відповідний аналіз в наступному підрозділі.

#### 2.4 Особливості розповсюдження радіохвиль на УКХ

Радіохвилі УКХ (Ultra High Frequency) мають деякі унікальні особливості розповсюдження, які варто враховувати під час їх використання.

Як і більшість інших радіохвиль вони також підвладні впливу дифракції, рефракції та поглинання.

Радіохвилі УКХ мають здатність проникати через перешкоди, такі як стіни та будівлі, до певної міри. Однак ця здатність залежить від матеріалів перешкод та інтенсивності сигналу. Проте у вільному просторі хвилі УКХ значно більше поглинаються ніж хвилі більш низькочастотних діапазонів, тому зазвичай потребують більшої потужності передавачів при передачі на більші відстані.

Вплив атмосферних умов може бути доволі значним. Такі погодні умови, як дощ, сніг, туман або інші атмосферні явища, можуть впливати на розповсюдження сигналу УКХ, зменшуючи дальність або якість зв'язку. Тому БПЛА рідко можуть підніматися поза хмари при наземному управлінні.

Важливою вимогою щодо організації зв'язку на УКХ є наявність прямої видимості (рис.2.4) Радіохвилі УКХ в основному розповсюджуються у прямій лінії від передавача до приймача. Чим більше перешкод на шляху сигналу, тим менший рівень сигналу ледь не до його повного зникнення.

Для орієнтовної оцінки безперешкодного поширення радіохвиль вводиться поняття відстані прямої видимості  $r_0$ , при якому пряма, що з'єднує передавальну й приймальну антени, торкається земної поверхні з еквівалентним радіусом  $R_e$  (рис. 2.4) [6, 7].

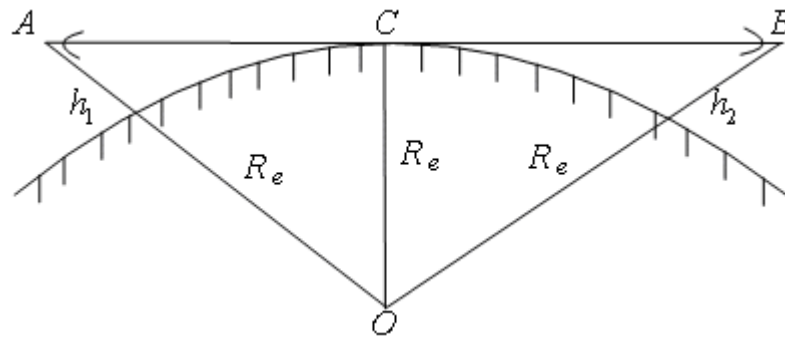


Рисунок 2.4 – До визначення відстані прямої видимості

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

$$AC = \sqrt{(R_e + h_1)^2 - R_e^2}; \quad (2.1)$$

$$BC = \sqrt{(R_e + h_2)^2 - R_e^2}. \quad (2.2)$$

Тоді

$$r_0 = \sqrt{2R_e} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.3)$$

При відсутності рефракції

$$g = 0, \quad r_0 = 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.4)$$

При стандартній рефракції

$$g = -8 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{м}}, \quad r_0 = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}). \quad (2.5)$$

Для частот, на яких відбувається управління БПЛА слід застосовувати форм. 2.4. Оскільки хвилі 800-5800 МГц майже не можуть розповсюджуватися поза видимий горизонт, оскільки фактично не проявляють властивостей атмосферної рефракції.

Слід розуміти, що відстань прямої видимості не є вичерпною умовою для гарантованого зв'язку. Оскільки на шляху розповсюдження радіосигналу можуть бути різні перешкоди, які будуть зменшувати рівень корисного сигналу.

На площині істотна область являє собою еліпс із фокусами в точках  $A$  і  $B$  (рис. 2.5).

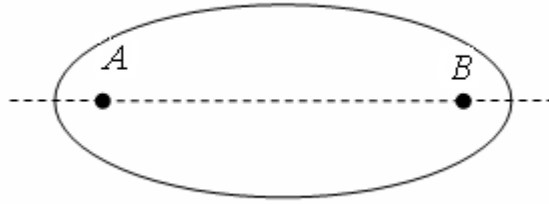


Рисунок 2.5 – Суттєва область на площині

Істотна область простору в однорідному середовищі являє собою еліпсоїд обертання з фокусами в точках  $A$  і  $B$ . Істотною областю вважають ту, що охоплює (8...12) зон Френеля. Поперечний переріз істотної області являє собою коло радіусом  $\rho$ .

Крім істотної області й області першого еліпсоїда Френеля при розрахунку радіоліній використовується поняття мінімальної області поширення радіохвиль. При цьому  $E_{\min} = E_0$  [6].

Поперечні розміри мінімальної області визначаються радіусом відповідної мінімальної зони  $\rho_{\min}$

$$\rho_{\min} = \sqrt{\frac{1}{3} r_0 \lambda k (1 - k)}, \quad (2.6)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі;

$k$  - відносна координата перешкоди ( $k = \frac{r_1}{r_0}$  або  $k = \frac{r_2}{r_0}$ );

$r_0$  - відстань між точками передачі й прийому (рис. 2.6).

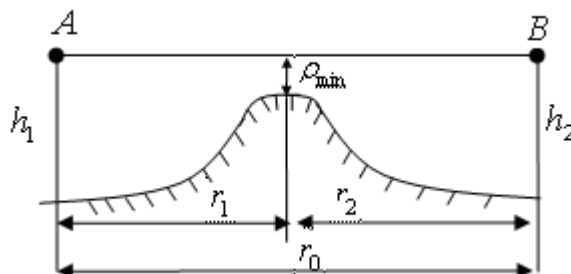


Рисунок 2.6 – До визначення радіуса мінімальної суттєвої області

Для забезпечення стійкого зв'язку необхідно вибрати висоти підвісу антен  $h_1$  і  $h_2$  такими, щоб просвіт між найвищою точкою перешкоди й лінією  $AB$  був більше або дорівнював  $\rho_{\min}$ .

Однак у випадку коли мова йде про роботу із БПЛА, і він знаходиться на значній висоті, істотна область для розповсюдження радіохвиль УКХ майже завжди є вільною від перешкод і таким чином, цим фактором на більш-менш відкритій місцевості можна знехтувати.

## 2.5 Модель розповсюдження радіохвиль

Для оцінки потенційної відстані можливого зв'язку оператора та БПЛА слід оцінювати багато різноманітних факторів, які будуть враховуватися для визначення втрат сигналу під час розповсюдження, і які фактично формують енергетичний бюджет радіолінії. Для вирішення цієї задачі можна скористатися вже готовими рішеннями, які були розроблені для систем стільникового зв'язку. Адже параметри радіолінії і специфіка застосування є дуже схожею із випадком системи зв'язку із БПЛА. В ролі абонентської станції буде виступати сам оператор дрона, а в якості базової станції – власне сам БПЛА. Єдине чим може відрізнятися дана ситуація, це те, що БПЛА інколи рухається, а оператор здебільшого статичний. Але в ті моменти, коли дрон зависає, ситуація подібна тій, яка є в мережі стільникового зв'язку. Тому дана теорія може бути з успіхом застосована.

Найбільшої популярності на УКХ для визначення втрат сигналу під час розповсюдження радіохвиль отримали наступні моделі: Окамури-Хата, COST231-Хата та Еріксона 9999. Їх широка застосовуваність пояснюється достатньою універсальністю щодо типів місцевості, відносна простота застосування та доволі висока точність розрахунків, адже ці моделі використовують аналітичні вирази побудовані на апроксимації емпіричних результатів.

Для ознайомлення із цими моделями можна подивитися параметри застосовуваності цих моделей, які наведені в табл. 2.3

Таблиця 2.3 – Параметри застосовуваності моделей розповсюдження радіохвиль

Назва моделі	Окамура-Хата	COST231 – Хата	Еріксона 9999
Діапазон описуваних частот, МГц	150-1500	1500-2000	>1500
Протяжність траси, км	1-20	1-20	1-20
Висота підвісу антени базової станції (БПЛА), м	30-200	30-200	30-200
Висота підвісу антени абонентської станції (оператор БПЛА)	1-10	1-10	1-10

Розглянемо дані моделі більш детально і проведемо подальший аналіз.

Для спрощення роботи з моделлю Окамура було розроблено модель Хата для частот 150–1500 МГц, де замість графічних залежностей складових втрат використовуються аналітичні вирази [8].

Ця модель є статистичною у розрахунку втрат на трасі поширення і рекомендована МСЕ. Вона ґрунтується на аналітичній апроксимації результатів практичних вимірювань. Розрахунок втрат проводиться для різних типів територій, таких як велике місто, середнє і мале місто, передмістя, відкриті території і села [8].

Розрахунок втрат на трасі в міських умовах здійснюється наступним чином [9, 10]

$$L_{BM} = 69.55 + 26.16 \lg(f) - 13.82 \lg(h_{BTS}) - \alpha(h_{MS}) + k(44.9 - 6.55 \lg(h_{BTS})) \lg(R) \quad (2.7)$$

де  $h_{BTS}$  - висота підвісу антени BTS, м;

$f$  - частота випромінювання (несуча частота), МГц;

$R$  - радіус стільника (відстань між BTS та MS), км;

$\alpha(h_{MS})$  - поправочний коефіцієнт, що залежить від висоти антени MS, м;

$\kappa$  - поправочний коефіцієнт, що враховує довжину траси. При  $R < 20$  км  $\kappa = 1$ .

Поправочний коефіцієнт  $\alpha(h_{MS})$  залежить від типу місцевості, в якій діє система зв'язку.

Для великих міст

$$\alpha(h_{MS}) \text{ дБ} = \begin{cases} 8,29 [\lg(1,54h_{MS})]^2 - 1,1 & \text{при } f \leq 200 \text{ МГц,} \\ 3,2 [\lg(11,75h_{MS})]^2 - 4,97 & \text{при } f > 200 \text{ МГц.} \end{cases} \quad (2.8)$$

Для малих та середніх міст

$$\alpha(h_{MS}) \text{ дБ} = (1,11 \lg f - 0,7) h_{MS} - (1,56 \lg f - 0,8). \quad (2.9)$$

Розрахунок втрат для передмістя [4, 8, 9] ведеться за формулою

$$L_{\text{передмістя}}, \text{ дБ} = L_{\text{м}}, \text{ дБ} - 2 \left[ \lg \left( \frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4. \quad (2.10)$$

В випадку відкритої та сільської місцевості

$$L_{\text{село/відкрит}}, \text{ дБ} = L_{\text{ВМ}}, \text{ дБ} - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - k, \quad (2.11)$$

$k = 40.98$  – для відкритої місцевості;

$k = 35.94$  – для сільської місцевості.

Наведені формули забезпечують задану точність при  $f = 150 \dots 1500$  МГц,  $h_{BTS} = 30 \dots 200$  м,  $h_{MS} = 1 \dots 10$  м,  $R = 1 \dots 20$  км.

Дія моделі (1.44) справедлива і для протяжної траси  $R = 20 \text{ км} < R < 100 \text{ км}$ , якщо коефіцієнт  $k$  вибрати із умови [11]

$$k = 1 + \left( 0,14 + 1,87 \cdot 10^{-4} f + 1,07 \cdot 10^{-3} h_{BTS} \right) \left[ \lg \left( \frac{R}{10} \right) \right]^{0,8} \quad (2.12).$$

Область використання (2.7) можна розширити до діапазону 2000 МГц. Це зроблено в моделі, яка носить назву COST 231-Nata Model (модифікована модель Хата) міські втрати поширення радіохвиль у місті  $L_M$  визначаються формулою [11]

$$L_M, \text{ дБ} = 46,3 + 33,9 \lg(f) - 13,82 \lg(h_{BTS}) - \alpha(h_{MS}) + (44,9 - 6,55 \lg(h_{BTS})) \lg R + C, \quad (2.13)$$

де  $C = 0 \text{ дБ}$  для міст з нещільною забудовою,  $C = 3 \text{ дБ}$  для міст із щільною забудовою.

Поправочний коефіцієнт  $\alpha(h_{MS})$  залежить від типу міста, де розгортається система зв'язку:

$$\alpha(h_{MS}) \text{ дБ} = \begin{cases} (1,11 \lg f - 0,7) h_{MS} - (1,56 \lg f - 0,8) & \text{нещільна забудова,} \\ 3,2 \left[ \lg(11,75 h_{MS}) \right]^2 - 4,97 & \text{щільна забудова.} \end{cases} \quad (2.14)$$

Для втрат в передмісті

$$L_{\text{передмістя}} = L_M - 2 \left( \lg \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4. \quad (2.15)$$

Для втрат в сільській місцевості

$$L_{\text{село}} = L_M - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 35,94. \quad (2.16)$$

Втрати на відкритому просторі

$$L_{\text{відкритий}} = L_M - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94. \quad (2.17)$$



Наступною є модель Еріксона 9999. Вона є розширенням моделі Окамура – Хата для частот понад 1500 МГц [12]

$$L = a_0 + a_1 * \lg(R) + a_2 * \lg(h_{bts}) + a_3 * \lg(h_{bts}) * \lg(R) - 3.2 * (\lg(11.75 * h_{ms}))^2 + 44.49 * \lg(f) - 4.78(\lg(f))^2 \quad (2.17)$$

де  $h_{BTS}$  - висота підвісу антени BTS, м;

$f$  - частота випромінювання (несуча частота), МГц;

$R$  - радіус стільника (відстань між BTS та MS), км;

Значення коефіцієнтів формули  $a_0, a_1, a_2, a_3$  вказані у табл. 2.4 і залежать від типів місцевості [13,14].

Таблиця 2.4 – Коефіцієнти моделі Еріксон 9999

Типи місцевості	Місто	Передмістя	Сільська
$a_0$	36,2	43,2	45,95
$a_1$	30,2	68,93	100,6
$a_2$	12	12	12
$a_3$	0,1	0,1	0,1

Як показав аналіз джерел [15,16] результати обчислень за моделлю Еріксон 9999 для сільської місцевості визивають сумніви, щодо їх достовірності відкрита місцевість взагалі не входить в цю модель. Хоча вона б потенційно переважала для обчислення втрат у діапазоні 5.8 ГГц на відміну від моделей Окамура-Хата та COST231 – Хата, які мають відповідні частотні обмеження для їх застосування для відеоканалу. В той же час саме відкрита місцевість є важливою з точки зору розрахунків, адже саме в цій місцевості найчастіше застосовуються БПЛА.

Саме тому, навіть за цих обставин, пропонується використовувати модель COST231 – Хата для розрахунків втрат в діапазоні 5.8 ГГц із деякими припущеннями.

### 3 АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ВІДСТАНІ УПРАВЛІННЯ БПЛА

3.1 Аналіз залежності втрат сигналу при розповсюдженні від висоти підвісу антени оператора

Проведемо аналіз факторів, які впливають на дистанцію зв'язку БПЛА. Для цього із моделей Окамура-Хата та COST231 – Хата і виразимо з них відстань зв'язку для сільської місцевості. При цьому будемо враховувати частотні діапазони для випадку кожного з каналів зв'язку: управління (900 та 2400 МГц) та відеоканалу (1,2 та 5.8 ГГц).

Втрати сигналу  $L$  при цьому можна обчислити наступним чином:

$$L = P_{\text{пд}} - P_{\text{пр}}, \text{ дБ} \quad (3.1)$$

Дистанції зв'язку для каналів управління та відеозв'язку для випадку відкритої місцевості наведені нижче, ці формули отримані із відповідних моделей: – Окамура- Хата (900 МГц та 1200МГц), та із COST 231 Хата (2400 МГц та 5800 МГц).

Формула для обчислення можливої відстані зв'язку 900 МГц (TBS Crossfire, ELRS) та відеоканалу 1200 МГц (Matek VTX):

$$R_{900,1200} = 10^{\left( \frac{P_{\text{пд}} - P_{\text{прм}} - 69.55 - 26.16 * \lg(f) + 13.82 * \lg(h_{\text{BTS}}) + \alpha(h_{\text{MS}}) + 4.78 * (\lg(f))^2 - 18.33 * \lg(f) + 40.94}{k(44.9 - 6.55 \lg(h_{\text{BTS}}))} \right)} \quad (3.2)$$

Формула для обчислення можливої відстані зв'язку 2400 МГц (ELRS) та відеоканалу 5800 МГц (АКК FX2):

$$R_{2400,5800} = 10^{\left( \frac{P_{\text{пд}} - P_{\text{прм}} - 46.3 - 33.9 * \lg(f) + 13.82 * \lg(h_{\text{BTS}}) + \alpha(h_{\text{MS}}) + 4.78 * (\lg(f))^2 - 18.33 * \lg(f) + 40.94}{k(44.9 - 6.55 \lg(h_{\text{BTS}}))} \right)} \quad (3.3)$$

Аналіз формул (3.2) та (3.3) дозволяє оцінити, які параметри впливають на дистанцію зв'язку. Серед їх сукупності можна виділити ті, котрі обмежені апаратно в поточній конфігурації обладнання зв'язку:

- потужність передавача  $P_{\text{пд}}$  ;
- чутливість приймача  $P_{\text{пр}}$  ;
- частота сигналу  $f$  ;

так і ті, на які можна впливати, обмежуючись зручністю та вирішуваними задачами:

- висота антени оператора  $h_{\text{MS}}$  ;
- висота польоту БПЛА  $h_{\text{BTS}}$  .

Але враховуючи той факт, що висота польоту БПЛА визначається певними задачами, які перед ним ставляться, то тоді єдиним доступним параметром, яким можна впливати на дистанцію зв'язку при всіх інших максимізованих параметрах є саме висота розташування антени оператора  $h_{\text{MS}}$  .

Проведемо аналіз залежності відстані зв'язку  $R(h_{\text{MS}})$  для трьох варіантів систем управління БПЛА: 900 МГц (TBS Crossfire, ELRS) та 2400 (ELRS) і двох варіантів систем відеозв'язку: 2400 МГц (ELRS) та 5800 МГц (АКК FX2) з метою оцінки потенційно можливих відстаней зв'язку оператора із БПЛА при їх використанні.

Результати обчислень за форм. (3.2) та (3.3) зведені в табл. 3.1. У якості вхідних параметрів для обчислень були взяті максимальні параметри відповідних систем зв'язку з табл. 2.2 та табл. 2.3, при цьому висота польоту БПЛА для була взята в 200 м.

Таблиця 3.1 – Потенційно досяжні відстані зв'язку для каналів управління та відеоканалів БПЛА для різного обладнання

Висота підвісу антени оператора, м	Відстань зв'язку, км					
	TBS Crossfire (900)	ELRS (900)	ELRS (2400)	MATE K VTX (1200)	SKYZO NE АКК (5800)	Відстань прямої видимості
0.5	145.073	998.558	144.955	14.354	3.317	53.012
1	166.333	1145	166.198	16.458	3.803	54.057
2	199.44	1373	199.279	19.734	4.56	55.536
3	226.434	1559	226.251	22.405	5.177	56.671
4	250.087	1721	249.884	24.745	5.718	57.627
5	271.561	1869	271.341	26.87	6.209	58.47
6	291.47	2006	291.234	28.84	6.664	59.232
7	310.186	2135	309.935	30.691	7.092	59.933
8	327.954	2257	327.688	32.449	7.498	60.585
9	344.945	2374	344.665	34.131	7.886	61.197
10	361.284	2487	360.991	35.747	8.26	61.777

Також в табл.3.1 доданий розрахунок відстані прямої видимості для розуміння, чи обмежуються отримані результати кривизною поверхні Землі чи ні.

Графічне відображення даних табл. 3.1 наведено на рис. 3.1. На ньому наведені обчисленн відповідних кожній із систем зв'язку дальностей зв'язку в залежності від висоти підвісу антени оператора БПЛА.

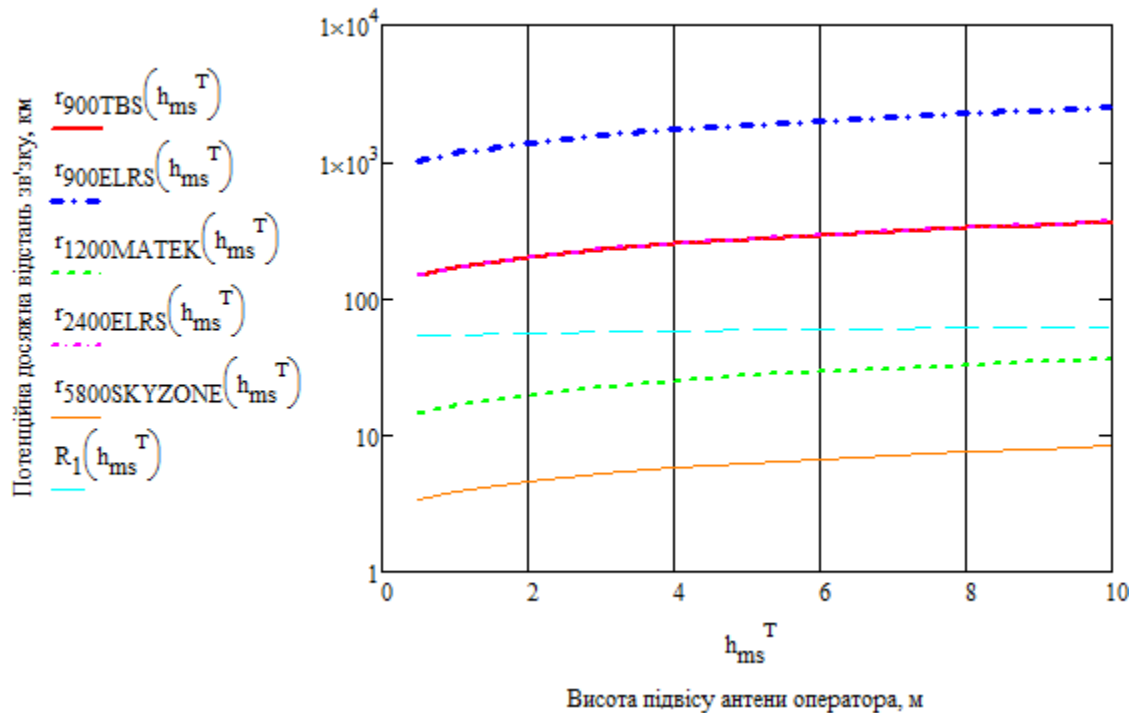


Рисунок 3.1 – Залежність потенційної відстані зв'язу від висоти розташування антени оператора БПЛА для різного обладнання, висота БПЛА = 200 м.

Результати аналізу отриманих даних наступні:

1. Найбільшу дальність, очікувано, мають канали зв'язу управління БПЛА, зокрема TBS Crossfire ( $r_{900TBS}$ ) та ELRS 900 МГц ( $r_{900ELRS}$ ). Це легко пояснюється тим, що приймачі цих виробників мають вражаючі показники чутливості та використовуються доволі низькі значення частот носійного сигналу. Цікавим є той факт, що графік залежності для обладнання ELRS 2400 МГц співпадає із залежністю TBS Crossfire, не дивлячись на відмінності у частоті носійного сигналу.

2. Значення отриманих відстаней для TBS Crossfire ( $r_{900TBS}$ ) та ELRS 900 МГц ( $r_{900ELRS}$ ) слід розцінювати як орієнтовні, оскільки, по-перше, самі використовувані моделі розповсюдження радіохвиль можуть бути використані для відстаней до 100 км, а по-друге обчислення коефіцієнта  $k$  для радіоліній від 20 км до 100 км вже потребує знання відстані радіолінії, що в свою чергу

унемоżliвлює подобний підхід для уточнення результатів обчислень. Тому для можливості обчислень використовувався коефіцієнт  $k = 1$ , як для радіоліній від 1 км до 20 км.

3. Не дивлячись на певні недоліки обчислень, що розглянуті вище, дальність зв'язку каналів управління фактично буде обмежена відстанню прямої видимості  $R_1$ , що видно з рис.

4. Але головним обмежуючим фактором дистанції управління БПЛА є відстань роботи відеоканалу «БПЛА- оператор», ці цілком пояснюється високими частотами носійного сигналу (5800 МГц) і більш низькими значеннями чутливості приймачів (ширина відео каналу суттєво більша ніж каналів управління). Найгірше себе показує відео канал 5800 МГц.

5. Отримані залежності яскраво демонструють ефективність збільшення висоти розташування антени оператора на дальність зв'язку. Але дані обчислення не враховували той факт, що дуже за рідких обставин можливе розташування антен на таких висотах без використання фідерного обладнання відповідної довжини.

### 3.2 Оцінка факторів реального обмеження дистанції зв'язку.

Найчастіше щоб розташувати антени на потрібній висоті використовується щогли заданої довжини із розміщеними на них антенами, а саме обладнання знаходиться внизу, для того щоб з'єднати антени і обладнання використовують високочастотні коаксіальні фідери або хвилеводи, в залежності від частоти.

Оскільки фідери є пасивними компонентами системи зв'язку, то їх використання призводить до втрат сигналу, рис. 3.2. Нажаль, дана ситуація є типовою для систем зв'язку, і параметри кабелю можуть вносити суттєвий вплив на рівень сигналу під час прийому, або відповідно передачі сигналу за ним.

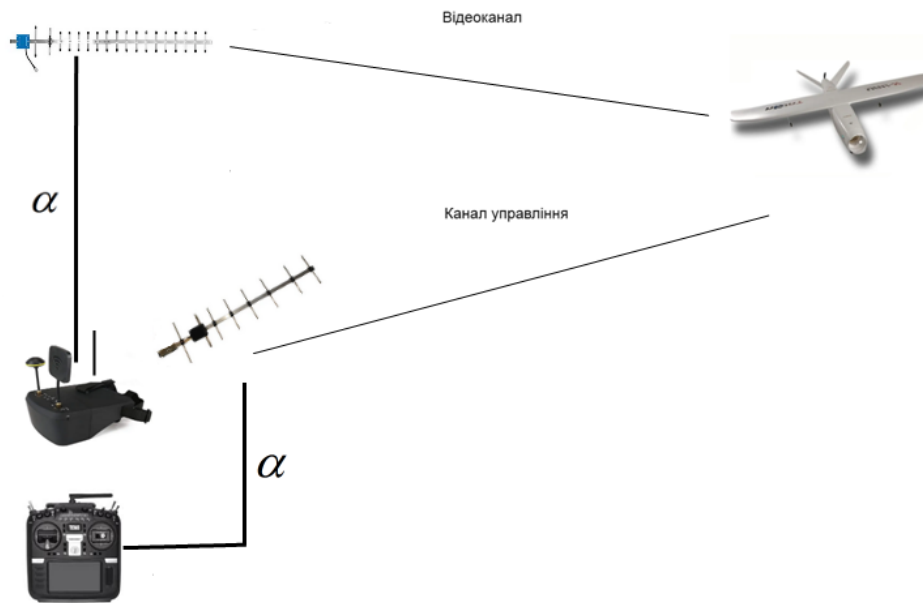


Рисунок 3.2– Підвіс антен на щоглах і використання фідерів для під'єднання антен призводить до появи втрат сигналу  $\alpha$

Втрати сигналу  $\alpha$ , дБ у фідері можуть бути обчислені за допомогою формули:

$$\alpha = \kappa * l, \quad (3.4)$$

де  $\kappa$  – питомі втрати сигналу у фідері, дБ/м;

$l$  – довжина фідера, м.

Виходячи із вищенаведеної формули, мінімізувати втрати сигналу у фідері відповідно можна двома шляхами: або зменшуючи довжину кабелю, або обирати кабель із мінімально можливими значеннями питомих втрат.

Перший варіант зменшення втрат не завжди можливий і доцільний, адже він диктується висотою підвісу антени, отже залишається тільки варіант пошуку високоякісного кабелю, який буде працювати на необхідних частотах.

Для того, щоб оцінити, які зміни відбудуться у потенційно можливих досяжних відстанях, що були отримані у табл. 3.1 введемо втрати сигналу  $\alpha$  у формули (3.2) та (3.3), зауважимо, що довжина фідеру  $l = h_{MS}$ :

$$R_{900,1200} = 10^{\left( \frac{P_{пл} - P_{прм} - 69.55 - 26.16 * \lg(f) + 13.82 * \lg(h_{BTS}) + \alpha(h_{MS}) + 4.78 * (\lg(f))^2 - 18.33 * \lg(f) + 40.94 - k(f) * l}{k(44.9 - 6.55 \lg(h_{BTS}))} \right)} \quad (3.5)$$

$$R_{2400,5800} = 10^{\left( \frac{P_{пл} - P_{прм} - 46.3 - 33.9 * \lg(f) + 13.82 * \lg(h_{BTS}) + \alpha(h_{MS}) + 4.78 * (\lg(f))^2 - 18.33 * \lg(f) + 40.94 - k(f) * l}{k(44.9 - 6.55 \lg(h_{BTS}))} \right)} \quad (3.6)$$

Проведемо дослідження змін у залежностях відстаней, що наведені на рис. 3.1., які відбудуться при появах втрат у фідері.

Для цього до розгляду візьмемо деякі популярні та доступні кабелі можуть працювати на НВЧ: RG-402/U, RG-405/U та універсальний кабель RG-58/U EUROSAT [17,18,19].

Структура кабелю RG-402/U та RG-405/U наведена на рис. 3.3 та рис. 3.4 відповідно.



Рисунок 3.3 – Структура кабелю RG-402/U





Рисунок 3.4 – Структура кабелю RG-405/U



Рисунок 3.5 – Структура кабелю RG-58/U

Як бачимо структури кабелів RG-402/U та RG-405/U є подібними і відрізняються тільки діаметрами. Розглянемо технічні характеристики кабелів, вони зведені в табл. 3.2

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики кабелів RG-402/U, RG-405/U, RG-58/U

Кабель	RG-402/U	RG-405/U	RG-58/U
Номінальна питома ємність, пФ/м	95.1	95.1	85,13
Імпеданс, Ом	50±2	50±2	50±2
Максимальна робоча частота, ГГц	30	40	2,5
Робоча температура, °С	-55 +200	-55 +200	-40 +70
Ефективність екранування, дБ	100	100	90
Коефіцієнт вкорочення	1.43	1.43	1.2
Вага, кг/м	0.0436	0.019	0.038
Ціна, \$/м	3	2,5	0,25

Таблиця 3.3 – Питоме згасання кабелів RG-402/U, RG-405/U, RG-58/U за частотами

Кабель	RG-402/U							
	Частота, МГц	500	1000	3000	5000	10000	18000	20000
Згасання, дБ/100 м	26	39	75	101	152	215	229	
Середня потужність, кВт	0.6	0.4	0.21	0.155	0.105	0.075	0.07	
Кабель	RG-405/U							
	Частота, МГц	500	1000	3000	5000	10000	18000	20000
Згасання, дБ/100 м	49	72	135	180	266	370	-	
Середня потужність, кВт	0.18	0.115	0.06	0.045	0.03	0.021	-	
Кабель	RG-58/U							
	Частота, МГц	500	1000	3000	5000	10000	18000	20000
Згасання, дБ/100 м	24.5	35	65	-	-	-	-	
Середня потужність, кВт	0.3	0.2	0.1	-	-	-	-	

Виходячи з результатів аналізу технічних характеристик кабелів у табл. 3.3 для частот до 3 ГГц можна рекомендувати кабель RG-58/U, так як він більш дешевий та гнучкий, має доволі мале згасання на робочих частотах. А для частот

понад 3 ГГц можна рекомендувати використовувати кабель RG-402/U, оскільки він має менше згасання відносно RG-405/U. За максимальною пропусковою потужністю всі кабелі відповідають технічним параметрам обладнання з табл. 2.2.

Отже для досліджень впливу фідеру на дистанцію зв'язку пропонується використати кабель RG-402/U для всіх типів каналів зв'язку на всіх частотах від 900 до 5800 МГц. Отримані залежності за формулами (3.5) та (3.6) дали результати, які зведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Потенційно досяжні відстані зв'язку для каналів управління та відеоканалів БПЛА для різного обладнання

Висота підвісу антени оператора, м	Відстань зв'язку, км					
	TBS Crossfire (900)	ELRS (900)	ELRS (2400)	MATE K VTX (1200)	SKYZON E АКК (5800)	Відстань прямої видимості
0,5	142.906	983.69	141.091	14.129	3.191	53.012
1	161.4	1111	157.456	15.945	3.52	54.057
2	187.786	1293	178.865	18.523	3.907	55.536
3	206.88	1424	192.392	20.375	4.107	56.671
4	221.714	1526	201.311	21.802	4.199	57.627
5	233.611	1608	207.092	22.937	4.221	58.47
6	243.302	1675	210.589	23.852	4.193	59.232
7	251.246	1729	212.323	24.592	4.131	59.933
8	257.759	1774	212.676	25.191	4.043	60.585
9	263.073	1811	211.928	25.671	3.973	61.197
10	267.362	1840	210.29	26.049	3.817	61.777

Графічне відображення даних табл. 3.5 наведено на рис. 3.6

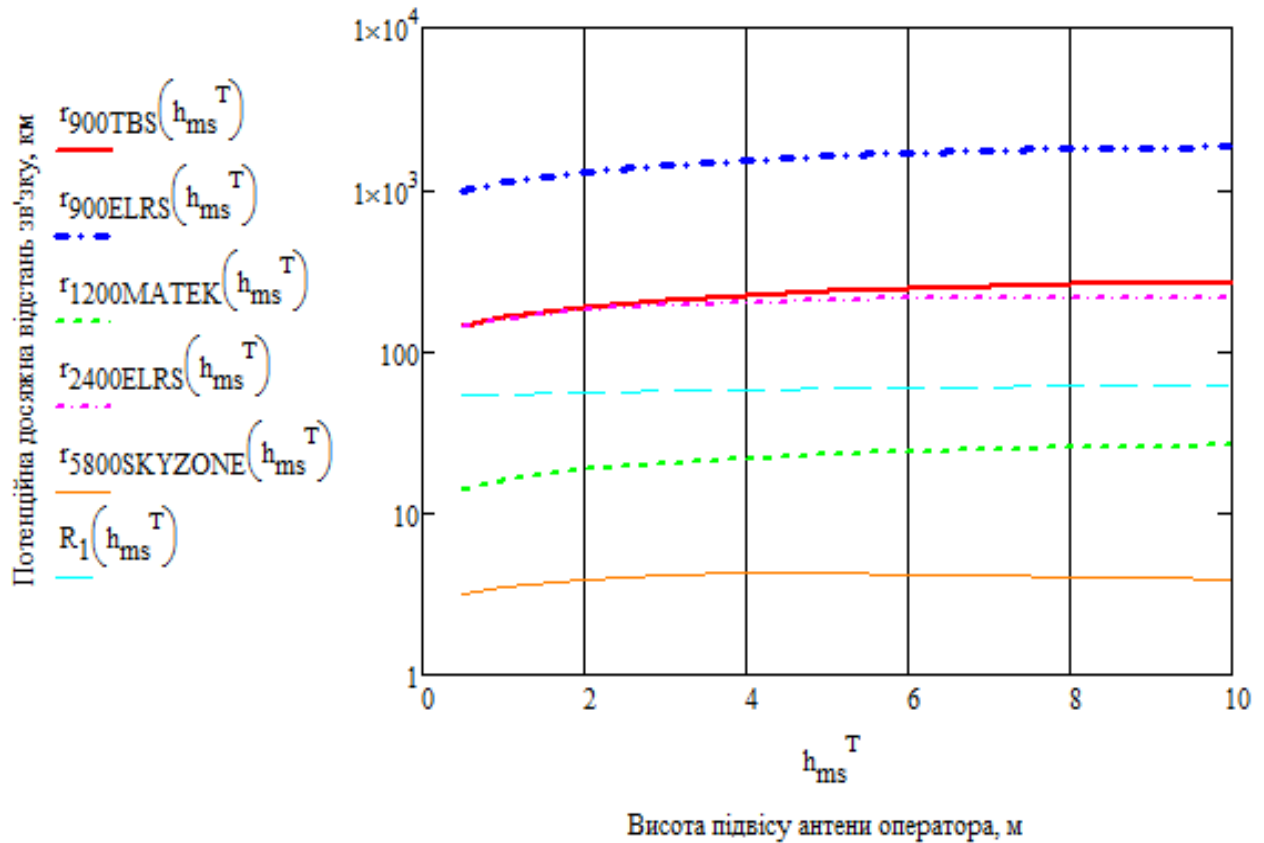


Рисунок 3.6 – Залежність потенційної відстані зв'язку від висоти розташування антени оператора БПЛА для різного обладнання, висота БПЛА = 200 м, кабель RG-402/U; пряма видимість (блакитний пунктир).

Як можна побачити з результатів обчислень, відбулися певні зміни в залежностях відстаней. Найкраще це видно для залежностей каналів 2.4 ГГц та 5.8 ГГц. Для інших залежностей різниця не така очевидна і може бути відслідкована при порівнянні даних табл. 3.5 та табл. 3.1.

Висновки з отриманих результатів можна зробити наступні:

1. Для каналів управління 900 МГц та відеоканалу 1200 МГц тренд залежності майже не змінився: зі збільшенням висоти підвісу антени оператора відстань зв'язку продовжує збільшуватися для всіх висот підвісу і як і раніше основним обмежуючим фактором для цих каналів зв'язку є саме відстань прямої видимості.

2. Інша картина для каналів управління 2.4 ГГц та відеоканалу 5.8 ГГц: із деяких висот підвісу антени оператора відстань зв'язку не тільки не збільшується,

а ще й зменшується. Для каналу 2.4 ГГц ця висота склала 9 м, а для каналу 5.8 ГГц – 6 м. Що це фактично означає: при поточних параметрах системи та обладнання немає смислу збільшувати висоту підвісу антени оператора при тому ж типі місцевості вище за 8 м, для частоти 2.4 ГГц та більше 5 м для частоти 5.8 ГГц. Оскільки ми отримуємо програш не тільки у відстані, а й ще у матеріальних витратах на більшу довжину кабелю і більш високу щоглу.

3. Боротися із цим шкідливим явищем можна декількома шляхами:

- використовувати ще кращий кабель і з ще меншим згасанням, проте це має свої недоліки – він суттєво дорожчий, складний в експлуатації, через свою товщину та жорсткість, потребує дороговартісних спеціальних роз'ємів;

- використовувати більш низькочастотні діапазони: для управління 900 МГц замість 2400 МГц, та 1200 МГц замість 5800 МГц;

- зробити фідер якнаймога коротшим, шляхом розташувати обладнання поряд з антеною.

Найбільший інтерес представляють два останні пункти вирішення цієї проблеми, оскільки жорсткі кабелі незручні, для операторів дронів, які постійно працюють з нових місць і мають часто розгортати обладнання на новій місцевості. Проте використання інших бендів також не завжди доступне та і сам діапазон 5.8 ГГц є дуже популярним, тому обладнання під нього доволі розповсюджене і відносно дешеве. Тому зупинемо увагу саме на ньому, для покращення відстані зв'язку саме на цьому діапазоні, як на тому, що має найбільш скромні характеристики щодо відстані зв'язку.

### 3.3 Оптимізація відеоканалу для збільшення дистанції зв'язку

Як показують проведені дослідження найбільш слабким місцем будь якої системи зв'язку із БПЛА є саме відеоканал. Це пояснюється більш високими частотами носійного сигналу та більш широкими смугами самого каналу, що призводить до меншої чутливості приймача, ніж у приймачів каналів управління.

За цих обставин на відкритій місцевості фактичним домінуючим обмежуючим фактором щодо відстані зв'язку із БПЛА є саме відеоканал, а не відстань прямої видимості, яка, як можна побачити із рис 3.6 завжди більша ніж досяжна відстань роботи відеоканалів будь то 1200 МГц і тимпаче 5800 МГц.

Збільшення підвісу антени оператора поліпшує ситуацію, але потребує збільшення фідерної лінії, що привносить певні проблеми, які були розглянуті вище. Саме тому зменшення втрат у фідері, особливо на 5800 МГц є найдоцільнішим шляхом боротьби за відстань зв'язку без збільшення потужності відеопередавача.

Найліпшим варіантом зменшення втрат у фідері – є його повна відсутність, або суттєва мінімізація, яка була б достатньою для підключення обладнання до антени.

Проте такий шлях вирішення проблеми є доволі проблематичним у практичній реалізації, оскільки основними приймачами відеосигналу є відеолошоми, окуляри або монітори, тобто такі пристрої із якими оператор має мати безпосередній візуальний контакт, або навіть одягати їх на голову (окуляри та шоломи). Звичайно, що в такому випадку, варіант розміщення такого приймального обладнання на щоглі, повінстю виключений через його недоцільність з точки зору експлуатації..

В даній роботі пропонується інший шлях вирішення цієї проблеми для аналогових систем відеозв'язку, який є універсальним для вищезгаданих відеоприймачів, а саме використання виносного радіоприймача, рис. 3.7.



Рисунок 3.7 – Використання виносного приймача

Ідея полягає в тому, що більшість відеоприймачів має відеовходи сигналу, котрі дозволяють виводити на екран зображення, що надходить в стандарті PAL/NTSC. Розташовуючи такий відеоприймач безпосередньо біля антени, або навіть під'єднуючи її напряму до такого приймача, що дає можливість суттєво зменшити згасання сигналу у фідері на ділянці де розповсюджується сигнал з частотою 5.8 ГГц. Після обробки сигналу виносним приймачем він подає його на вихід відеосигналу в форматі PAL/NTSC, параметри цих сигналів розглядалися у попередньому розділі, смуга носійного сигналу складає 6.5 МГц.

Між собою виносний радіоприймач з'єднується з відеоприймачем за допомогою звичайного відеокабелю, задача якого передати сигнал фактично з нульовою носійною частотою і смугою 6.5 МГц. Це суттєво знижує вимоги до якості кабелю, оскільки частота є доволі низкою і згасання в ньому відповідно може бути досягнуте дуже мале. Таким чином стає можливим за рахунок перенесення частоти з 5.8 ГГц до одиниць МГц значно знизити втрати сигналу в системі. Розглянемо більш детально організацію подібної системи у наступному розділі.

## 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯ 5.8 ГГц

### 4.1 Вибір виносного радіоприймача 5.8 ГГц

В якості виносного відеоприймача можна використовувати обладнання багатьох виробників. Розглянемо відеоприймач від виробника Skyzone модель називається R600, рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Відеоприймач відеосигналу 5.8 ГГц Skyzone R600

Ця модель була обрана серед інших через те, що вона має зручний дисплей із індикацією робочого каналу, режим автоматичного сканування частот, широкий діапазон напруг живлення, компактні розміри і що найважливіше збільшену чутливість приймача на 5 dBm відносно більшості штатних приймачів окулярів. Технічні характеристики радіоприймача наведені у табл.4.1 [20].



Таблиця 4.1 – Технічні характеристики радіоприймача Skyzone R600

Чутливість приймача	-95dBm
Діапазон частот	5.8GHz 32ch
Імпеданс антенного входу, Ом	50±2
Відеовихід	1.0Vp_p 75 Ом
Аудіовихід	1.0Vp_p 10K Ом
Розміри	90 x 54 x 15 мм
Вага	100 г
Напруга живлення	DC 7 - 24V

В якості кабелю для зв'язку, як бачимо із табл. 4.1 можна використати будь який коаксіальний кабель із хвильовим опором 75 Ом, або навіть кручену пару із хвильовим опором 120 Ом. Для з'єднання будуть потрібні два конектори Jack 2.5 мм із 4-ма пінами, рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Відео-аудіоджек 2.5 мм

В якості кабеля можна взяти коаксіальний РК75-2-13, який може працювати до 3 ГГц. Параметри згасання наведені в табл. 4.2 [21].

Таблиця 4.2 – Питоме згасання кабелю РК75-2-13

Кабель	РК75-2-13			
Частота, МГц	10	100	1000	10000
Згасання, дБ/100 м	6	22	68	260

Враховуючи мале питоме згасання кабеля на 10 МГц, його результуючим згасанням на довжині навіть 10 м (дистанція рознесення окулярів і виносного приймача) можна повністю знехтувати, на результуючу якість зображення воно не привнесе ніякого негативного впливу.

#### 4.2. Обчислення отриманих результатів

Отже проведемо дослідження, як зміниться залежність потенційно відстані зв'язку для відеоканалу 5.8 ГГц від висоти підвісу антени із врахуванням даної модифікації приймального обладнання відеосигналу із використанням виносного радіоприймача.

Розрахунки проводилися за формулою (3.3), з врахуванням відсутності втрат на ВЧ фідері, через використання для передачі сигналу відеокабелю, також врахована збільшена чутливість приймача. Результати обчислень наведені в табл.4.3. Вхідні параметри систем зв'язку залишаються такими самими, як і при проведенні попередніх обчислень. Це зроблено з метою кращого розуміння, який саме вплив дає оптимізація системи зв'язку із використанням виносно приймача відеосигналу.

Таблиця 4.3 – Потенційно досяжні відстані зв'язку для відеоканалів із використанням виносного приймача і без нього

Висота підвісу антени оператора, м	Відстань зв'язку, км		
	SKYZONE АКК (5800)	SKYZONE АКК + виносний приймач (5800)	Відносний виграш
0.5	3.191	4.879	1.52
1	3.52	5.594	1.58
2	3.907	6.708	1.72
3	4.107	7.616	1.85
4	4.199	8.411	2
5	4.221	9.133	2.16
6	4.193	9.803	2.34
7	4.131	10.432	2.52
8	4.043	11.03	2.72
9	3.973	11.601	2.92
10	3.817	12.151	3.18

Таблиця містить в собі розрахункові дані досяжної потенційної відстані зв'язку для відеоканалу у двох випадках: із використанням виносного приймача і без нього. В правому крайньому стовпці міститься розрахунок відносного виграшу у дистанції зв'язку між цюма двома варіантами обладнання.

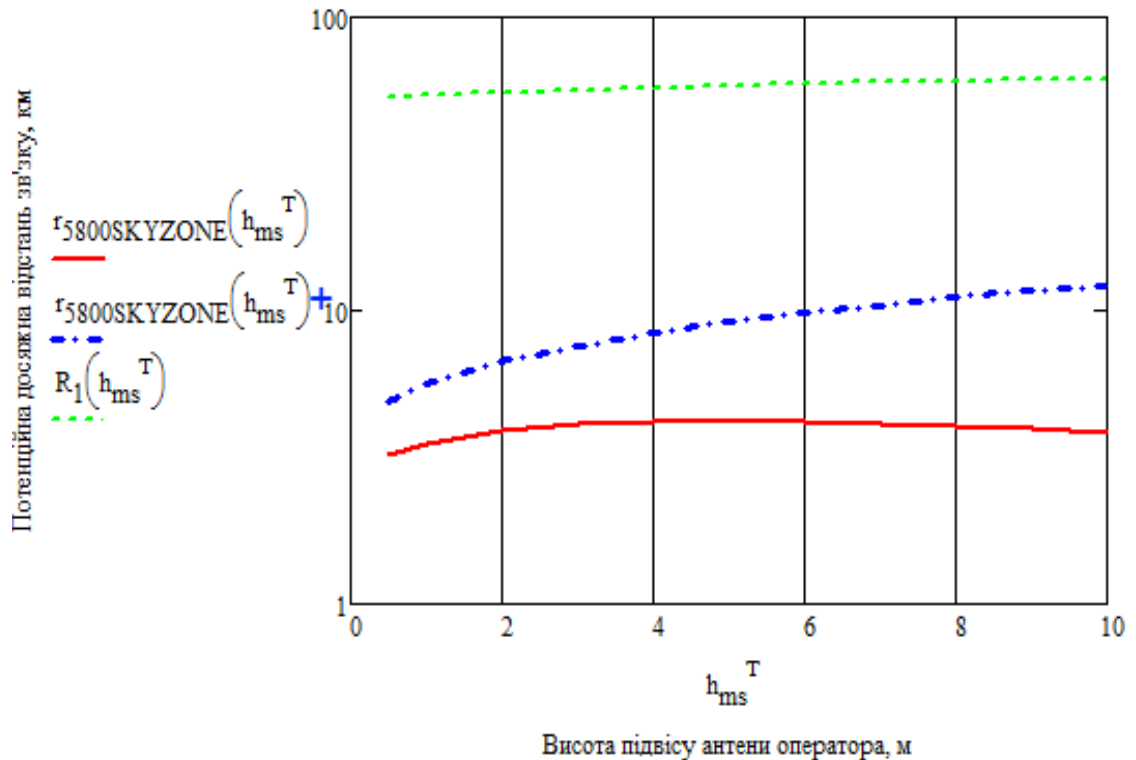


Рисунок 4.2 – Потенційно досяжні відстані зв'язку для відеоканалів із використанням виносного приймача (синій пунктир із точкою) і без нього (червона суцільна лінія)

#### 4.3 Загальна оцінка ефективності запропонованого рішення

Проведені дослідження запропонованого варіанту оптимізації відеоканалу, який полягає в перенесенні частоти відеосигналу з 5.8 ГГц на 6.5 МГц на ділянці оператора, показують перевагу запропонованого методу. Це добре видно як з табличних даних табл.4.3 так і рис. 4.2 Навіть на найменшій висоті підвісу антени оператора, коли ВЧ фідер найкоротший і не має вносити значного впливу, запропонований метод всеодно має перевагу у відстані в 1.52 рази, оскільки виносний відеоприймач має вищу чутливість ніж штатний приймач відеоокулярів Skyzone 02X.

У випадку із виносним приймачем, чим більше висота підвісу антени оператора, тим більше дальність зв'язку, цей тренд зберігається на всіх висотах

підвісу антени оператора (синій пунктир рис.4.2). В реальних умовах довжина відеокабелю може складати десятки метрів, що дозволяє суттєво збільшити висоту підвісу антени, що може бути доцільним у місцевості із пагорбами та іншим нерівностями рельєфу. Як видно із табл. 4.3, чим більша висота підвісу – тим більший виграш отримується від запропонованого методу. Таким чином при більших висотах підвісу виграш може бути ще більшим, адже фактично за рахунок переносу відеоканалу на низьку частоту 6.5 МГц втрати на ділянці відеокабелю мінімальні, і ними можна знехтувати. Максимальна можлива довжина відеокабелю потребує додаткових досліджень, але фактично вона обмежена омичними втратами відеокабелю.

## ВИСНОВКИ

В роботі проведений аналіз обмежуючих факторів, які впливають на дистанцію зв'язку із БПЛА.

Для оцінки дистанції зв'язку були використані моделі розповсюдження радіохвиль Окамура-Хата та COST-231 Хата. З'ясовано, що дальність розглянутих каналів управління фактично обмежуються дистанцією прямої видимості, чого не можна сказати про відеоканали.

Найбільш вузьким місцем, щодо максимізації дистанції зв'язку, очікувано став відеоканал:

- по-перше, це пояснюється більш високими діапазонами частот, які використовуються для відеоканалів, порівнянно із каналами управління;
- - по друге, меншими рівнями чутливості приймачів;
- - у третє, більшими втратами у фідерах антен.

Особливо погана ситуація із відеоканалами на частоті 5.8 ГГц. Проте обладнання цього діапазону дуже популярне і доступне, тому в роботі приділена увага саме йому.

Дослідження показали, що для випадку відкритої місцевості, підняття антени більше 5 м може бути навіть шкідливим для діапазону 5.8 ГГц. Це викликано значними втратами у фідері, навіть при використанні якісного кабелю із відносно малими втратами. Цю ситуацію можна покращити за рахунок використання ще кращих за згасанням фідерів, але практичне застосування таких рішень ускладнюється через їх значну жорсткість і складність підключення таких ліній до відеоокулярів, які знаходяться на голові оператора БПЛА.

В роботі був запропонований кардинальний варіант вирішення цієї проблеми шляхом використання виносного відеоприймача 5.8 ГГц, який можна розмістити безпосередньо біля антени. За рахунок цього мінімізується ділянка ВЧ фідеру із великими втратами, а сам відеосигнал перенесений на більш низьку

частоту, вже може бути переданий відеокабелем із настільки мінімальними втратами на довжинах у десятки метрів, що ними можна фактично знехтувати.

Результати щодо відстані оптимізованої системи із виносним приймачем та без нього наведені на рис.4.2. Можна побачити, що фактично висота підвісу оптимізованого варіанту призводить до постійного збільшення дистанції зв'язку. Відносний виграш у дистанції зв'язку в залежності від висоти підвісу антени оператора БПЛА наведений в табл 4.2. Для висот підвісу від 0.5 м до 10 м виграш склав від 1.52 до 3.18 відповідно.

Таким чином запропоноване рішення може суттєво підвищити дистанцію зв'язку із БПЛА під час використання відеоканалу 5.8 ГГц при незначних матеріальних витратах.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Відеоприймач Matek VRX-1G3-V2 1.2-1.3GHz, 2024. [Електронний документ] -Режим доступу: <https://radioland.com.ua/ua/products/matek-vrx-1g3-video-prijomnik-matek-vrx-1g3-v2-1-2-1-3ghz>
2. Відео передавач Matek VTX-1G3SE 9CH 1.2-1.3GHz, 2024. [Електронний документ] -Режим доступу: <https://radioland.com.ua/ua/products/matek-vtx-1g3se-9-video-peredatchik-matek-vtx-1g3se-9ch-1-2-1-3ghz>
3. Що обрати Crossfire vs ELRS?, 2024. [Електронний документ] -Режим доступу: <https://modelistam.com.ua/chto-vybrati-crossfire-elrs-a-291/>
4. PAL, 2024. [Електронний документ] -Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/PAL>
5. SECAM, 2024. [Електронний документ] -Режим доступу: PAL, 2024. [Електронний документ] -Режим доступу : <https://ru.wikipedia.org/wiki/SECAM>
6. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. Учебное пособие для радиотехнических специальностей ВУЗов. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975
7. 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
8. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980. Vol. 29. No. 3. Pp. 317–325.
9. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd edition. New Jer-sey: Prentice Hall, 2001. 707 p.
10. Dvornikov S.V., Balykov A.A., Kotov A.A. A simplified model for calculating signal losses in a radio link obtained by comparing Vvedensky's quadratic formula with existing empirical models. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti [Control Systems, Communications and Security]. 2019. No. 2. P. 87–99. (In Russian)



11. Закиров В.Г., Надеев А.Ф., Файзуллин Р.Р. Сотовая связь стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2004
12. Zreikat A., Dordevic M. Performance Analysis of Path loss Prediction Models in Wireless Mobile Networks in Different Propagation Environments. Proceedings of the 3rd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'17). 2017. No. VMW 103. С. VMW 103-1–VMW 103-11.
13. Imoize A.L., Dosunmu A.I. Path Loss Characterization of Long Term Evolution Network for Lagos, Nigeria. Jordan Journal of Electrical Engineering. 2018. Т. 4. No. 2. Pp. 114–128.
14. Mollel M.S., Kisangiri M. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Mobile Communication. Computer Engineering and Intelligent Systems. 2014. Vol. 5. No. 9. Pp. 1–10.
15. М. В. Мамченко, В. А. Зорин, М. А. Романова, Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств, Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2022, выпуск 1, 59–73
16. Андреев, Р. А., А. А. Прасолов, and А. С. Федоров. "АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ИЗВЕСТНЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ LORA." Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). 2022.
17. RG-405, 2024. [Электронный документ]-  
Режимдоступу: <http://radiolab.com.ua/index.php/component/content/article?id=72>
18. RG-402, 2024. [Электронный документ]-  
Режимдоступу: <http://www.radiolab.com.ua/index.php/component/content/article?id=71>
19. RG-58U, 2024. [Электронный документ]-Режимдоступу: <https://3g-group.com.ua/ua/p427468187-kabel-koaksialnyj-58u.html>
20. Skyzone R600 5.8G 32ch беспроводной AV-ресивер, 2024. [Электронный документ]-Режимдоступу: [https://hobbyking.com/ru\\_ru/skyzone-r600-5-8g-32ch-wireless-av-receiver.html?store=ru\\_ru](https://hobbyking.com/ru_ru/skyzone-r600-5-8g-32ch-wireless-av-receiver.html?store=ru_ru)

21. РК-75-2-13, 2024. [Электронный документ]-  
Режимдоступу: <https://delishes.com.ua/kabel.html>