

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка повітряного ретранслятору для зв'язку із БПЛА  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІМ-22-3

Козінець В.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. 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.

Студент / Козінець В.О. /

Керівник / Іваненко С.А. /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-наукова

Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Козінцю Володимирі Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка повітряного ретранслятору для зв'язку із БПЛА

затверджена наказом університету від 18 березня 2024 р. № 232 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи розробка повітряного ретранслятора для покращення дальності зв'язку із БПЛА Розглянути класифікації БПЛА та технічні характеристики каналів передачі інформації. Провести аналіз технологій та дальності зв'язку БПЛА, описати методи покращення дальності зв'язку. Запропонувати використання повітряного ретранслятору та провести розрахунки страт сигналу з його використанням та без. Описати реалізацію підключення повітряного ретранслятору

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_  
Вступ

1. Класифікація безпілотних літальних апаратів та технічні характеристики каналів передачі інформації

2. Аналіз технологій зв'язку для безпілотних літальних апаратів

3. Аналіз дальності зв'язку для безпілотних літальних апаратів

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи; класифікація безпілотних літальних апаратів та технічні характеристики каналів передачі інформації; основні характеристики каналів передавання даних БПЛА; аналіз технологій зв'язку для безпілотних літальних апаратів; використання методів ретрансляції для покращення дальності зв'язку; проведення розрахунків втрат сигналу при зв'язку з БПЛА; графік залежності відстані від частоти каналу зв'язку «БПЛА-ретранслятор–оператор»; реалізація повітряного ретранслятору; висновки.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	18.03.24	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	19.03-01.04.24	виконано
3	Постановка задачі на розробка повітряного ретранслятору для зв'язку із БПЛА	02.04-20.04.24	виконано
4	Розглядання класифікацій БПЛА та технічних характеристик каналів передачі інформації	21.04-30.05.24	виконано
5	Аналіз технологій зв'язку для безпілотних літальних апаратів	31.05-10.06.24	виконано
6	Аналіз дальності зв'язку для безпілотних літальних апаратів	11.06-13.06.24	виконано
7	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК	14.06-18.06.24	виконано

Дата видачі завдання 18 березня 2024 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 69 с., 5 рис., 10 табл., 17 джерела, 2 додатки.

Об'єкт дослідження – повітряний ретранслятор для БПЛА.

Мета роботи – розробка повітряного ретранслятора для покращення дальності зв'язку із БПЛА.

Робота спрямована на аналіз дальності зв'язку із БПЛА та розробку повітряного ретранслятора, який дозволить підвищити дальність зв'язку із БПЛА, забезпечуючи стабільний та надійний зв'язок на великій відстані.

У роботі проаналізовано технології зв'язку для БПЛА, включаючи цифрові, аналогові та антенні системи. Розглянуто принципи передачі сигналу, кодування та модуляції, а також вплив цих факторів на дальність зв'язку. Запропоновано використання повітряного ретранслятора для вирішення проблеми обмеженої дальності зв'язку з БПЛА, зокрема за допомогою відео передавача Matek VTX та відео приймача Matek VRX.

В роботі проведено розрахунки втрат сигналу для системи без ретранслятора та з використанням повітряного ретранслятора, що показують переваги та перспективи запропонованого рішення. Аналіз показує, що застосування повітряного ретранслятора дозволяє значно збільшити дальність зв'язку, забезпечуючи стабільний відеосигнал та надійний контроль БПЛА.

ПОВІТРЯНИЙ РЕТРАНСЛЯТОР, БПЛА, ДАЛЬНІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ, МОДУЛЯЦІЯ, ВТРАТИ СИГНАЛУ, ПЕРЕДАЧА ІНФОРМАЦІЇ, МЕТОДИ РЕТРАНСЛЯЦІЇ.

## THE ABSTRACT

Explanatory slip 69p., 5 fig., 10 tab., 17 sources, 2 attach.

Object of research – aerial relay for UAVs.

The purpose of the work – development of an aerial relay to improve the communication range with UAVs.

The work is aimed at analyzing the communication range with UAVs and developing an aerial relay that will increase the communication range with UAVs, ensuring stable and reliable communication over long distances.

The work analyzes communication technologies for UAVs, including digital, analog, and antenna systems. It examines the principles of signal transmission, coding, and modulation, as well as the impact of these factors on the communication range. The use of an aerial relay is proposed to address the problem of limited communication range with UAVs, particularly using the Matek VTX video transmitter and Matek VRX video receiver.

The work includes calculations of signal losses for a system without a relay and with the use of an aerial relay, demonstrating the advantages and prospects of the proposed solution. The analysis shows that the use of an aerial relay can significantly increase the communication range, providing a stable video signal and reliable control of UAVs.

AERIAL RELAY, UAV, COMMUNICATION RANGE, MODULATION, SIGNAL LOSSES, INFORMATION TRANSMISSION, RELAY METHODS.

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	9
ВСТУП .....	10
1 КЛАСИФІКАЦІЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ .....	11
1.1 Загальні відомості .....	11
1.2 Класифікація безпілотних літальних апаратів .....	12
1.3 Канали управління та передавання інформації в безпілотних літальних апаратах .....	17
1.4 Застосування безпілотних літальних апаратів в сучасних реаліях .....	21
1.5 Висновки до першого розділу .....	22
2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ .....	24
2.1 Цифрові та аналогові системи передачі даних у безпілотних системах .....	25
2.2 Антенні системи для забезпечення зв'язку з БПЛА .....	26
2.3 Системи кодування та модуляції сигналів у засобах зв'язку для БПЛА .....	27
2.4 Використання супутникового зв'язку у безпілотних системах .....	29
2.5 Протоколи та стандарти зв'язку для БПЛА .....	30
2.6 Висновки до другого розділу .....	32
3 АНАЛІЗ ДАЛЬНОСТІ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ .....	34
3.1 Фактори, що впливають на дальність зв'язку з безпілотними літальними апаратами .....	35
3.2 Методи покращення дальності зв'язку .....	37
3.3 Використання методів ретрансляції для покращення дальності зв'язку .....	39
3.4 Проведення розрахунків втрат сигналу при зв'язку з БПЛА .....	41
3.4 Реалізація підключення відео передавача Matek VTX .....	51
ВИСНОВКИ .....	54

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	56
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	58
ДОДАТОК Б ПУБЛІКАЦІЇ.....	65

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БПЛА (UAVs) – Unmanned Aerial Vehicles – безпілотні літальні апарати;
- QPSK – Quadrature Phase Shift Keying – квадратурна фазова модуляція;
- 16-QAM – 16-Quadrature Amplitude Modulation – 16-квадратурна амплітудна модуляція;
- OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогональне частотне мультиплексування;
- MIMO – Multiple Input Multiple Output – множинний вхід, множинний вихід;
- FHSS – Frequency-Hopping Spread Spectrum – спектр із частотним стрибкоподібним розширенням;
- DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum – спектр із прямою послідовністю;
- LoRa – Long Range – далекобійна (технологія бездротового зв'язку);
- FM – Frequency Modulation – частотна модуляція;
- AM – Amplitude Modulation – амплітудна модуляція;
- PM – Phase Modulation – фазова модуляція;
- QAM – Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція;
- RTP – Real-time Transport Protocol – протокол передачі в реальному часі;
- UDP – User Datagram Protocol – протокол користувачьких датаграм;
- УКХ – Ультракороткі хвилі.

## ВСТУП

Увесь час відбуваються наукові відкриття та технологічні досягнення, що змінюють наш спосіб життя і методи вирішення різних завдань. Однією з важливих сфер, де технології розвиваються надзвичайно швидко, є безпілотні літальні апарати. Вони використовуються в різних галузях, від військової до цивільної, для спостереження, розвідки, доставки вантажів і багатьох інших задач. Однак, одним з ключових викликів у використанні БПЛА є забезпечення стабільного зв'язку, особливо на великих відстанях або в умовах складного рельєфу місцевості.

Розробка повітряного ретранслятора для зв'язку з БПЛА є вирішенням цієї проблеми і метою роботи. Використання повітряного ретранслятора, може значно збільшити дальність зв'язку та забезпечити надійне з'єднання в умовах, де прямий зв'язок ускладнений.

Розвиток технологій безпілотних апаратів відбувається стрімкими темпами, і багато країн вкладають значні ресурси у вдосконалення цих систем. Потреба у надійному зв'язку стає все більш актуальною, і розробка ефективних рішень, таких як повітряні ретранслятори, відкриває нові можливості для використання БПЛА.

У наш час просто неможливо уявити сучасні військові та цивільні операції без участі БПЛА. Ефективний зв'язок між оператором і апаратом є критично важливим для успішного виконання завдань. Тому створення інноваційних рішень для покращення зв'язку, таких як повітряний ретранслятор, має велике значення.

Ця кваліфікаційна робота спрямована на демонстрацію та обґрунтування важливості розробку та впровадження повітряного ретранслятора для зв'язку з БПЛА. Ми розглянемо основні принципи його функціонування, технічні аспекти розробки та потенційні застосування. Створення такого повітряного ретранслятора дозволить значно покращити якість зв'язку.

# 1 КЛАСИФІКАЦІЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

## 1.1 Загальні відомості

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали важливою частиною сучасних технологій завдяки їхній універсальності та здатності виконувати широкий спектр завдань. Вони використовуються у військовій, цивільній, комерційній та науковій сферах, забезпечуючи нові можливості для досліджень, моніторингу та виконання спеціалізованих місій [1].

Історія розвитку БПЛА налічує понад століття, але найбільший прорив відбувся у наш час завдяки прогресу в галузі електроніки, телекомунікацій та авіаційної техніки. Перші БПЛА були простими пристроями, призначеними для обмежених завдань, проте сучасні апарати оснащені складними системами управління, навігації та зв'язку, що дозволяє їм виконувати більш складні та різноманітні завдання. БПЛА переживають період активного розвитку, і їх застосування стає все більш поширеним та різноманітним [2].

Безпілотний літальний апарат – це авіаційний засіб, що не має пілота на борту і керується дистанційно оператором або автономно за допомогою вбудованої системи керування. Класифікація БПЛА здійснюється за різними параметрами, такими як призначення, дальність і тривалість польоту, розмір, вага, тип енергоживлення та інші. Кожна з цих класифікацій дозволяє розділити БПЛА на категорії, що відповідають конкретним завданням та умовам експлуатації.

Основними компонентами БПЛА є фюзеляж, двигун, система керування, сенсори та камери, а також акумулятор або інше джерело енергії. Фюзеляж є основною конструкцією апарата, яка містить усі необхідні компоненти. Двигун забезпечує рух апарата у повітрі, система керування включає апаратуру для дистанційного керування та вбудовані контролери для автономного польоту,

сенсори та камери збирають дані та зображення під час польоту, а акумулятор або інше джерело енергії забезпечує живлення всіх систем апарата [3].

Розвиток БПЛА продовжується, зокрема в напрямках підвищення автономності, дальності та тривалості польоту, а також безпеки їх використання. Вдосконалення джерел живлення та аеродинамічних характеристик дозволяє збільшити ефективність апаратів. На рисунку 1.1 надано, як виглядає розвідувальний БПЛА на базі PD-2 від Ukrspesystems.



Рисунок 1.1 – Розвідувальний БПЛА

## 1.2 Класифікація безпілотних літальних апаратів

Класифікація БПЛА ґрунтується на різних параметрах, що дозволяє розділити їх на певні категорії залежно від призначення, за дальністю і тривалістю польоту, дальністю зв'язку тощо.

Це дає можливість ефективніше використовувати БПЛА в різних галузях. Відповідно до завдань, які вони виконують, БПЛА поділяються на декілька основних типів.

БПЛА військового типу:

– Розвідувальні БПЛА: використовуються для збору розвідувальної інформації. Вони оснащені камерами високої роздільної здатності, тепловізорами, радарми та іншими сенсорами, що дозволяють отримувати детальні зображення місцевості та об'єктів. Розвідувальні БПЛА забезпечують оперативне отримання даних про супротивника, його розташування та дії, що є критично важливим для прийняття рішень у військових операціях.

– Ударні БПЛА: оснащені зброєю, такі як ракети або бомби, і призначені для знищення цілей. Вони використовуються для виконання ударних місій, що дозволяє завдавати ударів по важливих об'єктах супротивника без ризику для пілотів. Ударні БПЛА можуть діяти як самостійно, так і в координації з іншими військовими засобами.

– БПЛА для електронної боротьби: призначені для виконання завдань з глушіння, перехоплення або спотворення ворожих комунікаційних систем і систем управління. Вони використовуються для зниження ефективності ворожих операцій, забезпечення інформаційної переваги та захисту власних сил.

БПЛА цивільного типу:

– БПЛА для аерофотозйомки та картографування: використовуються для створення високоточних карт, тривимірних моделей місцевості та аерофотознімків. Вони широко застосовуються в геодезії, будівництві, лісовому господарстві та урбаністичному плануванні. Оснащені спеціалізованими камерами та сенсорами, ці БПЛА дозволяють отримувати детальні дані про поверхню землі.

– БПЛА для моніторингу інфраструктури: призначені для інспекції та обстеження інфраструктурних об'єктів, таких як лінії електропередач, нафто- і газопроводи, мости та будівлі. Вони дозволяють здійснювати регулярні

перевірки та виявляти пошкодження чи зношення без необхідності відключення об'єктів або ризику для працівників.

– БПЛА для сільського господарства: використовуються для моніторингу стану полів, обробки рослин, внесення добрив і пестицидів. Вони допомагають фермерам оптимізувати використання ресурсів, підвищити врожайність і знизити витрати. Оснащені спеціальними сенсорами, такі БПЛА можуть надавати точні дані про стан культур і ґрунту.

– БПЛА для доставки товарів: призначені для транспортування товарів, медикаментів, їжі та інших вантажів. Вони забезпечують швидку та ефективну доставку в міських і віддалених районах, що є особливо важливим під час надзвичайних ситуацій або в умовах обмеженого доступу.

#### Рятувальні та пошукові БПЛА

– Пошуково-рятувальні БПЛА: використовуються для пошуково-рятувальних операцій у важкодоступних або небезпечних для людини місцях. Вони оснащені тепловізорами, камерами, гучномовцями та іншими засобами, що дозволяють швидко знаходити та рятувати постраждалих. Такі БПЛА є незамінними під час стихійних лих, аварій та інших надзвичайних ситуацій.

– БПЛА для медичних потреб: використовуються для доставки медикаментів, крові та інших медичних матеріалів у важкодоступні райони. Вони також можуть забезпечувати екстрену медичну допомогу, оснащені дефібриляторами, медичним обладнанням і засобами комунікації з медичними фахівцями.

Класифікація БПЛА за призначенням дозволяє розуміти їх спеціалізацію та вибрати оптимальні рішення для виконання конкретних завдань, враховуючи технічні характеристики, місце використання та вимоги до експлуатації.

Безпілотні літальні апарати класифікуються за дальністю і тривалістю польоту на кілька категорій, що визначає їхні технічні характеристики та області застосування, що наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація БПЛА за дальністю та тривалістю польоту

Категорія БПЛА	Дальність польоту	Тривалість польоту	Області застосування
Короткого радіусу дії	До 100 км	До кількох годин	Моніторинг, екологічні дослідження, інспекції об'єктів
Середнього радіусу дії	100 - 500 км	До 10 годин	Військові операції, розвідка, спостереження за катастрофами
Великого радіусу дії	500 - 1500 км	До 24 годин	Військові операції, тривалі розвідувальні місії, моніторинг
Надвеликого радіусу дії	Понад 1500 км	Понад 24 години	Стратегічні розвідувальні місії, кліматичні дослідження

БПЛА короткого радіусу дії (Short Range UAVs) призначені для польотів на відстань до 100 км та тривалість до кількох годин. Вони зазвичай використовуються для локальних завдань, таких як моніторинг невеликих територій, екологічних досліджень та інспекцій об'єктів.

БПЛА середнього радіусу дії (Medium Range UAVs) здатні здійснювати польоти на відстань від 100 до 500 км і мають тривалість польоту до 10 годин. Ці апарати застосовуються для більш масштабних завдань, включаючи військові операції, розвідку та спостереження за природними катастрофами.

БПЛА великого радіусу дії (Long Range UAVs) можуть здійснювати польоти на відстань від 500 до 1500 км і мати тривалість польоту до 24 годин. Вони широко використовуються у військових операціях, тривалих розвідувальних місіях та для моніторингу великих територій.

БПЛА надвеликого радіусу дії (Endurance UAVs) здатні перебувати в повітрі більше 24 годин та долати відстані понад 1500 км. Ці апарати призначені для стратегічних розвідувальних місій, спостереження за кліматом і дослідження віддалених територій.

Ця класифікація допомагає краще розуміти можливості та обмеження різних типів БПЛА, що дозволяє вибирати найоптимальніший варіант для виконання конкретних завдань.

БПЛА також класифікуються за дальністю зв'язку, згідно з вказаними у табл. 1.2 параметрами, що є ключовим фактором для визначення їхніх можливостей у різних операціях. Дальність зв'язку залежить від типу обладнання, яке використовується для передавання даних і управління, а також від умов експлуатації, таких як перешкоди і рельєф місцевості.

Таблиця 1.2 – Класифікація БПЛА за дальністю зв'язку

Категорія БПЛА	Дальність зв'язку	Області застосування
Короткого радіусу дії	До 5 км	Міські умови, будівельні майданчики, сільське господарство
Середнього радіусу дії	5 - 50 км	Спостереження за лісовими масивами, управління транспортними потоками
Великого радіусу дії	50 - 200 км	Військові розвідувальні місії, моніторинг кордонів, дослідження океанів
Надвеликого радіусу дії	Понад 200 км	Стратегічні розвідувальні місії, глобальний моніторинг клімату

БПЛА короткого радіусу дії призначені для роботи на відстані до 5 км. Такі дрони зазвичай використовують для завдань, що потребують високої точності та контролю в межах невеликої території. Вони часто застосовуються в міських умовах, на будівельних майданчиках і в сільському господарстві для моніторингу невеликих ділянок.

БПЛА середнього радіусу дії можуть працювати на відстані від 5 до 50 км. Вони здатні виконувати завдання, що потребують ширшого охоплення, такі як спостереження за лісовими масивами, управління транспортними потоками та розвідка.

БПЛА великого радіусу дії призначені для роботи на відстані від 50 до 200 км. Ці дрони використовуються в операціях, що потребують дальшого охоплення, наприклад, у військових розвідувальних місіях, моніторингу кордонів та дослідженнях океанів.

БПЛА надвеликого радіусу дії можуть функціонувати на відстані понад 200 км. Такі апарати оснащені супутниковими системами зв'язку та іншими передовими технологіями для забезпечення стійкого зв'язку на великих відстанях. Вони застосовуються в стратегічних розвідувальних місіях, глобальному моніторингу клімату та дослідженнях віддалених територій.

Ця класифікація дозволяє краще розуміти, які саме типи БПЛА підходять для різних завдань, зважаючи на потреби в зв'язку та управлінні на різних відстанях.

### 1.3 Канали управління та передавання інформації в безпілотних літальних апаратах

Канали управління БПЛА призначені для передачі команд оператора до апарата. Вони повинні бути надійними та забезпечувати малу затримку сигналу, що є критичним для стабільного та безпечного польоту. Основні технічні характеристики каналів управління включають:

Частотний діапазон: канали управління працюють у різних частотних діапазонах, включаючи 2.4 ГГц та 5.8 ГГц. Вибір частоти залежить від вимог до дальності та стійкості зв'язку [4].

Пропускна здатність: канали управління потребують меншої пропускної здатності порівняно з каналами передачі інформації, оскільки передаються лише команди управління.

Надійність зв'язку: використовуються різні методи покращення надійності, такі як кодове розширення спектра та частотне розмаїття, щоб уникнути перешкод і забезпечити стійкість зв'язку.

Канали передавання інформації відповідають за передачу інформації від бортових сенсорів до наземної станції або інших кінцевих точок. Вони повинні забезпечувати високу пропускну здатність і стійкість для надійної передачі відео, зображень та інших даних, згідно з параметрами наведеними у табл. 1.3. Основні технічні характеристики включають:

Пропускна здатність: канали передавання даних вимагають високої пропускної здатності, особливо для передачі відео високої чіткості. Пропускна здатність може досягати десятків Мбіт/с.

Частотний діапазон: використовуються частоти від 900 МГц до 5.8 ГГц, залежно від вимог до дальності та перешкодостійкості, найчастіше зустрічається використання частот 1.2 ГГц та 5.8 ГГц.

Методи модуляції та кодування: використовуються різні методи модуляції та кодування, такі як QPSK, 16-QAM, OFDM, для забезпечення ефективної та надійної передачі даних. [5].

Технології: включають використання MIMO (Multiple Input Multiple Output) для підвищення пропускної здатності та стійкості зв'язку.

Канали управління та передачі інформації є критичними елементами системи БПЛА, забезпечуючи надійний та ефективний зв'язок між оператором і апаратом, а також передачу важливої інформації для виконання завдань.

Таблиця 1.3 – Основні характеристики каналів управління та передачі даних БПЛА

Параметр	Канали управління	Відеоканали
Частотний діапазон	500 МГц -5.8 ГГц	1200 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц
Пропускна здатність	Низька	Висока
Надійність	Висока, з використанням корекції помилок	Висока, з використанням сучасних методів модуляції та кодування
Затримка сигналу	Низька	Залежить від типу даних та методу передачі
Методи покращення зв'язку	Кодове розширення спектра, частотне розмаїття	МІМО, адаптивна модуляція та кодування

Канали передавання інформації у складі БПЛА відіграють ключову роль у забезпеченні надійного зв'язку між літальним апаратом та наземними станціями або іншими об'єктами. Ці канали відповідають за передачу відео, зображень, телеметричних даних та іншої інформації, необхідної для ефективного управління та виконання місій, згідно з характеристиками наведеними у табл. 1.4.

Пропускна здатність каналів передавання даних залежить від типу передаваних даних та вимог до якості зв'язку. Для відео високої чіткості та інших великих обсягів даних потрібна висока пропускна здатність, яка може досягати десятків Мбіт/с. У той же час, для передачі телеметричних даних достатньо меншої пропускної здатності [6].

Канали передавання інформації можуть використовувати різні частотні діапазони, такі як 900 МГц, 2.4 ГГц та 5.8 ГГц. Вибір частоти залежить від вимог до дальності зв'язку, стійкості до перешкод та умов експлуатації. Наприклад, нижчі частоти, як 900 МГц, можуть забезпечити більшу дальність зв'язку, тоді як

вищі частоти, як 5.8 ГГц, забезпечують вищу пропускну здатність і меншу затримку.

Для забезпечення ефективної та надійної передачі даних у БПЛА використовуються різні методи модуляції та кодування сигналів. Серед них найбільш поширеними є:

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying): забезпечує високу стійкість до шуму та перешкод, що важливо для стабільного зв'язку.

16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation): використовується для передачі великих обсягів даних завдяки високій пропускну здатності.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): дозволяє передавати дані по кількох піднесучих частотах, забезпечуючи високу пропускну здатність та стійкість до перешкод.

Для покращення ефективності та надійності каналів передавання інформації використовуються різні технології, такі як:

MIMO (Multiple Input Multiple Output): технологія, яка використовує кілька антен на передавачі та приймачі для підвищення пропускну здатності та покращення якості зв'язку.

Адаптивна модуляція та кодування (AMC): дозволяє автоматично змінювати параметри модуляції та кодування залежно від умов зв'язку, забезпечуючи оптимальну якість передачі даних [7].

Таблиця 1.4 – Основні характеристики каналів передавання даних БПЛА

Параметр	Характеристика
Частотний діапазон	900 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц
Пропускна здатність	До десятків мегабіт за секунду
Методи модуляції	QPSK, 16-QAM, OFDM

## Продовження таблиці 1.4.

Технології	МІМО, адаптивна модуляція та кодування (АМС)
Надійність	Висока, завдяки використанню передових технологій
Затримка сигналу	Залежить від типу даних та методу передачі

Канали передавання інформації у БПЛА забезпечують важливий зв'язок для виконання різноманітних завдань, від розвідувальних місій до доставки вантажів. Висока пропускну здатність, надійність та стійкість до перешкод роблять ці канали критично важливими для успішної роботи безпілотних систем.

#### 1.4 Застосування БПЛА в сучасних реаліях

Безпілотні літальні апарати стають невід'ємною частиною сучасного світу, знаходячи застосування в різних галузях, від військових операцій до комерційних і цивільних завдань, згідно з вказаними у табл 1.4 застосуванням у різних галузях. Їх використання зростає завдяки технічним інноваціям, які підвищують ефективність і розширюють можливості цих апаратів.

У військових цілях БПЛА широко використовуються для розвідки, спостереження, цілевказівки та ударів, забезпечуючи можливість виконання місій у небезпечних умовах без ризику для життя операторів.

У комерційному секторі БПЛА використовуються для агровиробництва, моніторингу полів, визначення стану рослин, розпилення добрив та пестицидів. У будівництві та інфраструктурі вони допомагають обстежувати будівлі, мости, дороги та створювати тривимірні моделі об'єктів. Також БПЛА використовуються для логістики та доставки малих вантажів і посилок у віддалені або важкодоступні райони [8].

В цивільних завданнях БПЛА застосовуються в пошуково-рятувальних операціях для виявлення людей у важкодоступних місцях або під час стихійних

лих, моніторингу навколишнього середовища для спостереження за змінами клімату, рівнем забруднення та станом екосистем. Вони також використовуються для забезпечення громадського порядку, моніторингу масових заходів та охорони об'єктів.

Наукові та дослідницькі місії часто залучають БПЛА для кліматологічних досліджень, збирання даних про атмосферні умови та кліматичні зміни, археологічних розкопок, створення детальних карт місцевості та виявлення археологічних пам'яток без необхідності фізичного втручання, а також океанографічних досліджень для спостереження за станом океанів та морів, зокрема для моніторингу коралових рифів та вивчення морської флори і фауни [9].

Таблиця 1.5 – Застосування БПЛА в різних галузях

Галузь	Застосування
Військова	Розвідка, спостереження, цілевказівка, удари
Агровиробництво	Моніторинг полів, внесення добрив та пестицидів
Будівництво та інфраструктура	Обстеження будівель, створення 3D моделей
Логістика та доставка	Доставка вантажів та посилок
Пошуково-рятувальні операції	Виявлення людей у важкодоступних місцях
Моніторинг навколишнього середовища	Спостереження за змінами клімату та екосистемами
Безпека та спостереження	Громадський порядок, моніторинг масових заходів
Наукові дослідження	Кліматологічні, археологічні, океанографічні дослідження

## 1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто класифікації БПЛА та технічні характеристики їхніх каналів управління та передачі інформації. Визначення різновидів БПЛА за призначенням, дальністю і тривалістю польоту, а також за дальністю зв'язку, що дозволяє зрозуміти широкий спектр їхнього застосування та вимоги до систем зв'язку.

Ці дані є важливими для розробки комплексної системи повітряного ретранслятора, яка включатиме передавачі, приймачі та канали передачі відеоінформації. Аналіз технічних характеристик каналів управління та передавання інформації, наприклад відео- або телеметричних даних, дає можливість оцінити можливості та обмеження існуючих систем зв'язку, що є критичним для ефективної розробки нової системи.

Розглянуті технічні характеристики, такі як частотний діапазон, тип модуляції та рівень інтерференції, допоможуть визначити оптимальні параметри ретранслятора для забезпечення надійного зв'язку. Крім того, врахування специфічних вимог до каналів управління та передавання інформації для різних типів БПЛА дозволить адаптувати ретранслятор під конкретні задачі, забезпечуючи стабільність зв'язку навіть у складних умовах.

Знання про класифікацію БПЛА та їхні вимоги до зв'язкових систем допоможуть визначити, які саме технічні рішення потрібно використовувати для забезпечення стабільного і якісного зв'язку на великих відстанях. Наприклад, ми можемо скористатися інформацією про типи антен та їх характеристики, щоб обрати найбільш підходящі параметри для ретранслятора. Також важливими є дані про різні протоколи зв'язку, які забезпечують високу надійність та пропускну здатність.

Таким чином, розуміння класифікації БПЛА та особливостей їхніх каналів зв'язку є основою для визначення технічних вимог до компонентів повітряного ретранслятора, що є необхідним для його ефективного проектування та впровадження

## 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Безпілотні літальні апарати використовують різноманітні технології зв'язку для управління, передачі даних та взаємодії з операторами. Ефективність та надійність цих систем безпосередньо впливають на успішність виконання завдань БПЛА. Передача відеосигналу з БПЛА вимагає використання технологій, що забезпечують високу пропускну здатність та надійність [10]. Цифрові системи зв'язку є найбільш поширеними в сучасних безпілотних літальних апаратах. Вони використовуються для передачі відео- та аудіосигналів, телеметрії, команд управління та інших даних. Переваги цифрових систем включають високу якість передачі, захищеність від перешкод, можливість кодування та стиснення даних, що забезпечує більш ефективне використання пропускну здатності. Цифрові системи зв'язку можна зустріти в різних застосуваннях БПЛА: у військових безпілотах для забезпечення надійного зв'язку та передачі розвідувальних даних, у комерційних БПЛА для передачі відео високої якості для зйомки та моніторингу, а також у наукових дослідженнях для збору і передачі даних про стан атмосфери, водних об'єктів та інших природних середовищ.

Аналогові системи зв'язку знаходять своє застосування, особливо у випадках, коли потрібна простота та надійність. Вони забезпечують безперервну передачу сигналу без перетворення його в цифровий формат, що може бути корисним для певних задач.

Антенні системи відіграють ключову роль у забезпеченні надійного зв'язку між БПЛА та оператором. Вони можуть бути різних типів та конфігурацій, залежно від конкретних потреб та умов експлуатації. Основні типи антенних систем, які використовуються у БПЛА, включають направлені антени, що забезпечують високу потужність сигналу на великі відстані і використовуються для забезпечення зв'язку на великих відстанях, ненаправлені антени, які

забезпечують покриття у всіх напрямках, що корисно для забезпечення стабільного зв'язку на коротких відстанях або в умовах обмеженого простору; та фазовані антенні решітки, які використовуються для динамічного керування напрямом сигналу та забезпечення стійкого зв'язку навіть у рухомих об'єктах.

Технології зв'язку для БПЛА є різноманітними та багатофункціональними. Від вибору конкретної технології залежать ефективність та надійність виконання завдань безпілотного літального апарата. Розуміння різних систем зв'язку допомагає оптимізувати використання БПЛА в різних сферах діяльності.

## 2.1 Цифрові та аналогові системи передачі даних у безпілотних системах

Забезпечення надійного зв'язку для БПЛА є критично важливим для виконання їхніх завдань.

Цифрові системи передачі даних мають низьку перевагу перед аналоговими, зокрема високу якість сигналу, можливість передачі великих обсягів даних і захист від перешкод. Цифрові системи зв'язку забезпечують високий рівень захисту даних та надійності передачі сигналу на великі відстані. Цифрові системи зв'язку є ключовим компонентом управління БПЛА, оскільки вони забезпечують передачу різноманітних типів даних, таких як відео, аудіо, телеметрія та інші критично важливі дані. Використання цифрових систем дозволяє досягати високої якості сигналу, стійкості до перешкод і ефективного використання спектру частот. Управління безпілотними літальними апаратами здійснюється через цифрові канали зв'язку, які використовують різні протоколи передачі даних. Наприклад, протоколи FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) та DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) широко використовуються для забезпечення надійного зв'язку. Ці технології дозволяють зменшити вплив перешкод і покращити безпеку передачі. Технологія FHSS, наприклад, забезпечує частотні стрибки у межах 2.4 ГГц або 5.8 ГГц діапазонів, що знижує ризик перехоплення сигналу. Цифрові системи забезпечують високу якість передачі відео та аудіо даних у реальному часі. Сучасні БПЛА використовують

кодеки H.264 або H.265 для компресії відео, що дозволяє передавати відео високої роздільної здатності (наприклад, 1080p або навіть 4K) при відносно низькій ширині каналу. Відео передається з мінімальною затримкою. Телеметричні дані включають інформацію про положення, швидкість, висоту, стан батареї та інші параметри польоту БПЛА. Для передачі телеметричних даних використовуються цифрові системи з низькою затримкою та високою надійністю, такі як LoRa (Long Range) технологія. LoRa дозволяє передавати дані на великі відстані, до 10-15 км в умовах прямої видимості [11].

Аналогові системи зв'язку використовуються в БПЛА особливо у випадках, коли потрібна простота та надійність. Аналогові системи зв'язку використовують радіохвилі для передачі команд управління від оператора до БПЛА. Такі системи можуть працювати на різних частотах, наприклад, 27 МГц, 72 МГц, 433 МГц, 900 МГц та інших. Аналогові системи забезпечують передачу відео в реальному часі з мінімальною затримкою. Відеосигнал передається на частотах 5.8 ГГц або 2.4 ГГц і може охоплювати відстані до кількох кілометрів у залежності від потужності передавача та умов навколишнього середовища. Якість аналогового відео нижча ніж у цифрових систем, і може бути схильна до шуму та перешкод. Типова роздільна здатність аналогового відео становить 480p або 720p [12].

У сучасних БПЛА зустрічаються гібридні системи передачі даних, вони поєднують переваги як цифрових, так і аналогових систем. Наприклад, цифрові системи можуть використовуватися для передачі команд управління та телеметричних даних, тоді як аналогові системи – для передачі відео в реальному часі. Це дозволяє оптимізувати роботу системи передачі даних, забезпечуючи високу надійність і швидкість реакції.

## 2.2 Антенні системи для забезпечення зв'язку з БПЛА

Антенні системи є важливим компонентом для забезпечення ефективного зв'язку з безпілотними літальними апаратами. Вони впливають на якість,

надійність і дальність зв'язку. Різні типи антенних систем мають свої особливості та переваги.

Всеспрямовані антени забезпечують рівномірне поширення сигналу в усіх напрямках, що особливо корисно при маневруванні БПЛА. Їхні основні переваги включають простоту конструкції та відсутність необхідності точної орієнтації. Однак їхня дальність обмежена через розсіювання енергії сигналу в усіх напрямках.

Спрямовані антени зосереджують енергію сигналу в конкретному напрямку, підвищуючи ефективність передачі. Вони дозволяють збільшити дальність зв'язку та підвищити якість сигналу, але вимагають точної орієнтації на цільовий об'єкт.

Антени з автоматичним стеженням оснащені системами автоматичного слідування за рухом БПЛА. Вони забезпечують оптимальну орієнтацію антени для підтримання найкращої якості зв'язку. Ці антени є більш складними та дорогими, але забезпечують високу ефективність і автоматичне регулювання.

На борту БПЛА можуть бути використані вбудовані антени, інтегровані в конструкцію апарата. Це зменшує аеродинамічний опір і забезпечує надійний зв'язок без значної збільшення ваги.

Вибір антенних систем залежить від конкретних потреб і умов використання БПЛА. Правильно підібрана антена може значно покращити ефективність зв'язку, забезпечуючи стабільний та надійний сигнал навіть на великій відстані.

### 2.3 Системи кодування та модуляції сигналів у засобах зв'язку для БПЛА

Системи кодування та модуляції сигналів є ключовими елементами у засобах зв'язку для БПЛА, вони визначають, як інформація передається від передавача до приймача, забезпечуючи кращу ефективність та надійність зв'язку.

Кодування сигналів включає в себе перетворення інформаційних даних у форму, зручну для передачі через канал зв'язку. Метою кодування є підвищення

стійкості до перешкод, корекція помилок і забезпечення ефективного використання пропускнуої здатності каналу. Одним із поширених методів кодування є використання корекційних кодів, таких як Код Хеммінга, що дозволяє виявляти і виправляти помилки в переданих даних [13].

Модуляція сигналів визначає спосіб перетворення інформаційних даних у електромагнітні хвилі для передачі через канал зв'язку. Існує кілька типів модуляції, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Частотна модуляція (FM) та амплітудна модуляція (AM) є базовими методами, що використовуються в аналогових системах. Цифрові системи зв'язку часто використовують складніші методи модуляції, такі як фазова модуляція (PM) та квадратурна амплітудна модуляція (QAM), які забезпечують більш високу ефективність передачі даних.

Згідно з табл. 2.1 наведено порівняння основних методів модуляції сигналів, що використовуються в засобах зв'язку для БПЛА

Таблиця 2.1 – Порівняння основних методів модуляції сигналів

Метод модуляції	Опис	Переваги	Недоліки
Частотна модуляція (FM)	Зміна частоти несучого сигналу відповідно до переданого сигналу	Стійкість до амплітудних перешкод, простота реалізації	Обмежена пропускну здатність
Амплітудна модуляція (AM)	Зміна амплітуди несучого сигналу відповідно до переданого сигналу	Простота реалізації, використання в аналогових системах	Чутливість до перешкод, низька ефективність використання спектра
Фазова модуляція (PM)	Зміна фази несучого сигналу відповідно до переданого сигналу	Висока стійкість до перешкод, ефективно використання спектра	Складність реалізації

## Продовження таблиці 2.1.

Квадратурна амплітудна модуляція (QAM)	Зміна амплітуди і фази несучого сигналу для передавання даних	Висока пропускна здатність, ефективне використання спектра	Висока складність реалізації, чутливість до фазових і амплітудних перешкод
--	---	--	--

Використання оптимальних методів кодування та модуляції забезпечує надійний та ефективний зв'язок між БПЛА та наземними станціями управління, що є критично важливим для успішного виконання місій та завдань.

#### 2.4 Використання супутникового зв'язку у безпілотних системах

Супутниковий зв'язок відіграє важливу роль у забезпеченні надійного зв'язку для безпілотних літальних апаратів, особливо при виконанні завдань на великих відстанях або у важкодоступних районах. Використання супутникового зв'язку дозволяє забезпечити безперервний зв'язок і передачу даних між БПЛА та наземними станціями управління, що є критично важливим для виконання місій, пов'язаних з моніторингом, розвідкою, пошуково-рятувальними операціями та іншими завданнями.

Основні переваги використання супутникового зв'язку в безпілотних системах включають глобальне покриття, високу надійність і можливість передачі великого обсягу даних на значні відстані. Супутниковий зв'язок дозволяє БПЛА працювати у віддалених районах, де відсутня інфраструктура наземного зв'язку, або в умовах, коли традиційні методи зв'язку не можуть забезпечити необхідну якість передачі даних.

Супутникові системи зв'язку для БПЛА можуть використовувати різні орбіти, включаючи геостаціонарні, середньоорбітальні та низькоорбітальні супутники. Геостаціонарні супутники забезпечують стабільний зв'язок з

фіксованою точкою на Землі, що дозволяє легко налаштувати і підтримувати зв'язок. Середньоорбітальні та низькоорбітальні супутники забезпечують меншу затримку сигналу та можуть використовуватися для передачі даних з високою швидкістю.

Технічні характеристики супутникового зв'язку включають частотні діапазони, типи модуляції, методи корекції помилок та протоколи передачі даних. Частотні діапазони, що використовуються для супутникового зв'язку, включають L-діапазон (1-2 ГГц), С-діапазон (4-8 ГГц), Ku-діапазон (12-18 ГГц) та Ka-діапазон (26-40 ГГц). Вибір діапазону залежить від вимог до пропускної здатності, дальності зв'язку та стійкості до перешкод.

Модуляція сигналів у супутникових системах зв'язку для БПЛА може включати фазову модуляцію (PM), квадратурну амплітудну модуляцію (QAM) та інші методи, що забезпечують високу ефективність передачі даних. Корекція помилок виконується за допомогою кодів, таких як LDPC-коди (коди з низькою щільністю перевірок на парність), що підвищує надійність зв'язку.

Супутниковий зв'язок для БПЛА зазвичай використовує спеціалізовані протоколи передачі даних, такі як IP-супутникові мережі або протоколи, розроблені для космічних комунікацій. Ці протоколи оптимізовані для роботи в умовах високих затримок та обмеженої пропускної здатності, забезпечуючи надійну і ефективну передачу даних.

Застосування супутникового зв'язку у безпілотних системах дозволяє значно розширити можливості БПЛА, забезпечуючи їхню ефективну роботу у будь-яких умовах і на будь-яких відстанях, що робить цей тип зв'язку незамінним інструментом для сучасних безпілотних технологій.

## 2.5 Протоколи та стандарти зв'язку для БПЛА

Протоколи та стандарти зв'язку є ключовими елементами забезпечення ефективного і надійного обміну даними між безпілотними літальними апаратами та наземними станціями управління. Вони визначають правила та процедури

передачі даних, що дозволяють забезпечити сумісність різних систем зв'язку, підвищити надійність і безпеку передачі інформації, а також оптимізувати використання доступних ресурсів [14].

Протоколи зв'язку для БПЛА поділяються на кілька основних категорій:

Протоколи управління та телеметрії:

- MAVLink (Micro Air Vehicle Link): широко використовуваний протокол обміну даними між автопілотами БПЛА і наземними станціями управління. MAVLink забезпечує передачу команд управління та телеметричних даних, таких як координати, швидкість, стан акумулятора тощо.

- STANAG 4586: стандарт, розроблений НАТО для забезпечення сумісності між різними системами управління БПЛА. Включає визначення інтерфейсів для обміну даними управління та телеметрії.

Протоколи передачі відео та даних:

- RTP (Real-time Transport Protocol): використовується для передачі відео та аудіо даних у реальному часі. Забезпечує мінімальну затримку та високу якість передачі даних.

- UDP (User Datagram Protocol): легкий транспортний протокол, що забезпечує швидку передачу даних без встановлення з'єднання. Використовується для передачі відеопотоків і телеметрії.

Протоколи маршрутизації та обміну даними:

- ZigBee: протокол, що забезпечує бездротовий зв'язок між пристроями на короткі відстані. Використовується для створення мереж датчиків і керування БПЛА.

- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network): протокол для бездротових мереж великої дальності з низьким енергоспоживанням. Забезпечує зв'язок між БПЛА та наземними станціями у важкодоступних районах.

Стандарти зв'язку для БПЛА регулюються міжнародними організаціями та включають:

- IEEE 802.11 (Wi-Fi): широко використовуваний стандарт для бездротових мереж, що забезпечує передачу даних на середні відстані.

Використовується для обміну даними між БПЛА та наземними станціями в умовах прямої видимості.

- 3G/4G/5G: стандарти мобільного зв'язку, що забезпечують передачу даних на великі відстані. Використовуються для забезпечення зв'язку БПЛА у міських умовах та зонах з покриттям мобільної мережі.

- IEEE 802.15.4: стандарт для бездротових персональних мереж з низьким енергоспоживанням. Використовується для створення мереж датчиків та керування БПЛА.

- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): технологія, що використовується для підвищення стійкості сигналу до перешкод. Використовується в системах зв'язку БПЛА для забезпечення надійності передачі даних.

Використання різних протоколів та стандартів зв'язку дозволяє забезпечити надійну і ефективну роботу безпілотних літальних апаратів у різних умовах. Вибір конкретного протоколу або стандарту залежить від вимог до дальності зв'язку, пропускної здатності, надійності та умов експлуатації. Сучасні протоколи та стандарти забезпечують високу сумісність між різними системами, що сприяє розвитку інновацій та підвищенню ефективності використання БПЛА.

## 2.6 Висновки до другого розділу

Аналіз технологій зв'язку для БПЛА, проведений у цьому розділі, надає всебічне розуміння різноманітних технологічних рішень, що можна використовувати для розробки повітряного ретранслятора. Важливість цього аналізу полягає в тому, що дозволяє визначити оптимальні підходи до забезпечення стабільного та надійного зв'язку між оператором та БПЛА, враховуючи специфічні вимоги та обмеження кожної технології.

Цифрові системи зв'язку є невід'ємною частиною сучасних БПЛА завдяки їх можливостям передавати великі обсяги даних з високою швидкістю та надійністю. Вони забезпечують високу якість передачі відео та аудіосигналів,

телеметрії та команд управління. Цифрові системи зв'язку використовують методи кодування та стиснення даних, що дозволяє ефективно використовувати смугу пропускання та зменшувати вплив перешкод.

Аналогові системи зв'язку мають свої переваги у простоті та надійності. Вони можуть бути корисними для задач, де потрібна безперервна передача сигналу без затримок та конверсій. Аналогові системи, такі як традиційні FM або AM радіопередавачі, можуть забезпечувати стабільний зв'язок в умовах, де цифрові системи можуть зазнавати труднощів через високу частоту перешкод або обмежену смугу пропускання.

Антенні системи є ключовим елементом забезпечення якісного зв'язку між БПЛА та оператором. Використання направлених антен дозволяє сфокусувати сигнал в одному напрямку, що підвищує дальність та якість зв'язку. Знання про різні типи антенних систем дозволяє обирати оптимальні рішення для конкретних умов експлуатації, що є критичним для розробки повітряного ретранслятора.

Методи кодування та модуляції сигналів також відіграють важливу роль у забезпеченні надійного зв'язку. Використання методів, таких як QPSK або OFDM, дозволяє зменшити втрати сигналу та підвищити стійкість до перешкод, це особливо важливо для систем зв'язку з БПЛА, де умови передачі сигналу можуть змінюватися через рух апарату та вплив зовнішніх факторів.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що розробка повітряного ретранслятора для зв'язку з БПЛА вимагає комплексного підходу, який включає вибір оптимальних технологій зв'язку, методів кодування та модуляції сигналів. Ці знання дозволяють створити ефективний та надійний пристрій, здатний забезпечити стабільний зв'язок на великих відстанях та у складних умовах експлуатації. Зокрема, використання аналогових систем зв'язку в повітряному ретрансляторі може забезпечити безперервну передачу сигналу, що є критично важливим для підтримки надійного зв'язку з БПЛА.

### 3 АНАЛІЗ ДАЛЬНОСТІ ЗВ'ЯЗКУ З БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Аналіз дальності зв'язку з безпілотними літальними апаратами включає розгляд кількох ключових факторів, які визначають ефективність і стабільність зв'язку. Основні фактори включають потужність передавача і чутливість приймача, які безпосередньо впливають на те, наскільки далеко може поширюватися сигнал.

Частота сигналу є важливим аспектом: нижчі частоти краще проходять через перешкоди, але вимагають більших антен, тоді як вищі частоти передають більше даних, але більш схильні до втрат. Тип антени, зокрема антени з високим коефіцієнтом посилення, може значно покращити дальність зв'язку.

Перешкоди та завади, наприклад, електромагнітні завади від інших джерел, можуть знижувати якість сигналу. Рельєф місцевості та перешкоди на шляху сигналу також відіграють важливу роль. Використання високих точок для передавачів і приймачів, а також ретрансляторів, може допомогти подолати ці перешкоди.

Погодні умови, можуть впливати на дальність зв'язку, особливо на високих частотах. Протоколи зв'язку та методи кодування сигналів, наприклад QPSK або OFDM можуть зменшити втрати сигналу і підвищити стійкість до перешкод, збільшуючи дальність зв'язку.

Теорія розповсюдження радіохвиль допомагає прогнозувати і оцінювати поведінку сигналів у різних умовах, включаючи відбиття, заломлення, поглинання та розсіювання.

Ці фактори мають бути враховані для оптимізації систем зв'язку для БПЛА, забезпечуючи максимальну дальність та якість зв'язку, що є особливо важливим при розробці повітряного ретранслятора для забезпечення стабільного зв'язку на великих відстанях і в складних умовах.

### 3.1 Фактори, що впливають на дальність зв'язку з безпілотними літальними апаратами

Дальність зв'язку з безпілотними літальними апаратами залежить від багатьох факторів, які можна розділити на кілька основних категорій: технічні характеристики обладнання, умови навколишнього середовища, параметри передачі сигналу та конструктивні особливості апаратури [15].

Загальні втрати сигналу при зв'язку з безпілотними літальними апаратами можуть бути розділені на кілька компонентів, кожен з яких теоретично впливає на втрати сигналу. Формула загальних втрат сигналу (3.1):

$$L_{\text{заг.}} = L_{\text{пр.}} + L_{\text{пош.}} + G_{\text{ант.}} + L_{\text{інші}}, \quad (3.1)$$

де  $L_{\text{пр.}}$  – втрати сигналу через вільний простір;

$L_{\text{пош.}}$  – втрати сигналу через поширення у реальному середовищі;

$G_{\text{ант.}}$  – підсилення антен;

$L_{\text{інші}}$  – інші втрати.

Втрати сигналу через вільний простір залежать від відстані між передавачем і приймачем та частоти сигналу. Відстань між БПЛА та наземною станцією впливає на розсіювання сигналу в просторі. Чим більша відстань, тим більше сигнал втрачається через розсіювання. Частота сигналу також впливає: сигнали з вищою частотою зазнають більших втрат. Для мінімізації втрат через вільний простір можна зменшити відстань між передавачем і приймачем або вибрати частоту, яка менше втрачає енергію при поширенні.

Втрати сигналу через поширення у середовищі обумовлені характеристиками середовища, через яке проходить сигнал. Середовище може містити перешкоди, такі як будівлі, дерева, гори та інші природні або штучні об'єкти, які можуть поглинати, відбивати або розсіювати сигнал. Також на втрати сигналу впливають атмосферні умови, такі як дощ, туман, сніг та вологість. Для

зменшення втрат через поширення необхідно обирати оптимальний маршрут для сигналу або використовувати підсилювачі та ретранслятори.

Антени з високим коефіцієнтом підсилення можуть значно знизити загальні втрати сигналу  $L_{\text{заг.}}$ . Підсилення антен залежить від якості антен та їх налаштування.

До інших втрат відносяться втрати, пов'язані з погодними умовами, такі як дощ, сніг, туман та атмосферні явища, можуть впливати на дальність зв'язку, особливо на високих частотах. Волога у повітрі може поглинати радіохвилі, зменшуючи дальність зв'язку. Тому важливо враховувати погодні умови при плануванні місії з використанням БПЛА.

Розповсюдження радіохвиль залежить від багатьох факторів, включаючи частоту, потужність передавача, природу середовища, через яке проходить хвиля, та наявність перешкод. Радіохвилі можуть відбиватися, заломлюватися, поглинатися та розсіюватися, що впливає на якість і дальність сигналу. Теорія розповсюдження радіохвиль включає моделі передавання вільного простору, моделі розсіювання та багатошляхової передачі, які допомагають прогнозувати і оцінювати поведінку сигналів у різних умовах.

Для визначення втрат сигналу при поширенні радіохвиль у реальних умовах, можливо скористатись першим рівнянням при зв'язку на УКХ (3.2):

$$A = \frac{P_{\text{пд.}}}{P_{\text{с вх.пр.}}} = \frac{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2}{G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2}, \quad (3.2)$$

Де  $r$  – відстань між передавачем і приймачем;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$G_1$  – коефіцієнт посилення передавальної антени;

$G_2$  – коефіцієнт посилення приймальної антени;

$\mu_1$  – коефіцієнт корисної дії передавального фідера;

$\mu_2$  – коефіцієнт корисної дії приймального фідера;

$v$  – множник ослаблення.

Рівняння описує, збільшення відстані між передавачем і приймачем призводить до квадратичного збільшення втрат сигналу, чим більша довжина хвилі, тим менші втрати сигналу при тій самій відстані. Посилення антен передавальної і приймальної сторін визначає ефективність передачі і прийому сигналу в електромагнітний ефір і з нього. Використання антен з високим коефіцієнтом посилення зменшує втрати сигналу. Коефіцієнти корисної дії фідерів визначають ефективність передачі сигналу від передавача до антени і від антени до приймача. Високий коефіцієнт корисної дії означає менші втрати сигналу в фідерах. Множник ослаблення враховує додаткові втрати сигналу через вплив зовнішніх факторів, таких як погода, перешкоди, рельєф місцевості тощо. Квадратична залежність цього множника підкреслює його значний вплив на загальні втрати сигналу. Це рівняння дозволяє визначити, які фактори найбільше впливають на втрати сигналу і як їх можна мінімізувати для покращення дальності зв'язку з БПЛА.

Враховання всіх цих факторів дозволяє оптимізувати системи зв'язку для БПЛА, забезпечуючи максимальну дальність та якість зв'язку.

Аналіз показав, що дальність зв'язку із БПЛА як правило обмежена дистанцією зв'язку за відеоканалом. При цьому ця дальність для частоти 5.8 ГГц в залежності від умов та обладнання складає від 500 м до 5 км. В той же час потреба в управлінні БПЛА може бути і на відстані десятків кілометрів. Тому проведемо аналіз методів збільшення відстані зв'язку.

### 3.2 Методи покращення дальності зв'язку

Оптимізації технічних характеристик апаратури, покращення алгоритмів обробки сигналів, використанні сучасних технологій зв'язку та розробка повітряного ретраслятору, дозволяє вирішити задачу покращення дальності зв'язку з БПЛА.

Антени з високим коефіцієнтом підсилення є критично важливими компонентами в системах зв'язку. Вони дозволяють покращити якість та дальність зв'язку завдяки спрямованому випромінюванню радіохвиль. Антенні системи з високим коефіцієнтом підсилення є ключовими елементами для забезпечення зв'язку на великій відстані з БПЛА, оскільки вони зменшують втрати сигналу. Коефіцієнт підсилення антени, який позначається як  $G$  і вимірюється в децибелах (дБ), визначає, наскільки ефективно антена випромінює або приймає радіохвилі у певному напрямку порівняно з ідеальною ізотропною антеною, яка випромінює рівномірно в усіх напрямках. Високий коефіцієнт підсилення означає, що антена спрямовує більшу частину своєї потужності в конкретному напрямку, зменшуючи втрати і покращуючи дальність зв'язку.

Коефіцієнт підсилення антени обчислюється за формулою 3.3 :

$$G = \frac{4pA}{\lambda^2}, \quad (3.3)$$

Де  $G$  – коефіцієнт підсилення антени;

$A$  – ефективна площа антени;

$\lambda$  – довжина хвилі.

Ефективна площа антени визначає, наскільки ефективно антена може приймати електромагнітну енергію, і вона залежить від фізичних розмірів антени та її конструкції.

Іншим важливим методом є застосування адаптивних алгоритмів модуляції та кодування. Використання адаптивної модуляції дозволяє змінювати тип модуляції в залежності від якості каналу зв'язку. Наприклад, при гарній якості каналу може використовуватися високошвидкісна модуляція, а при погіршенні умов зв'язку може застосовуватися більш стійка модуляція з нижчою швидкістю передачі даних. Адаптивне кодування, в свою чергу, дозволяє

зменшити кількість помилок при передачі даних, що також покращує дальність зв'язку.

Використання методів просторового мультиплексування (MIMO) також є ефективним способом покращення дальності зв'язку. Системи MIMO використовують кілька антен для передачі та прийому сигналів, що дозволяє збільшити пропускну здатність каналу та покращити стійкість зв'язку до інтерференції та загасання сигналу. Завдяки цьому можна досягти значного збільшення дальності зв'язку з БПЛА.

Ще одним методом є застосування повітряних ретрансляторів для збільшення дальності зв'язку. Ретранслятори можуть бути розташовані на літальних апаратах, типа дрону, і приймати сигнал від БПЛА, та передавати далі до пункту управління. Це дозволяє значно збільшити дальність зв'язку, особливо у випадках, коли прямий зв'язок між БПЛА та пунктом управління ускладнений через наявність перешкод.

Важливим аспектом є також використання сучасних протоколів зв'язку, які оптимізовані для роботи в умовах низьких рівнів сигналу та високих завад. Протоколи з адаптивним управлінням потужністю передачі, корекцією помилок та управлінням доступом до каналу можуть значно покращити якість зв'язку та збільшити його дальність [16].

Таким чином, покращення дальності зв'язку з БПЛА може бути досягнуто за рахунок комплексного застосування теоретичних методів, що включають оптимізацію антенних систем, використання адаптивних алгоритмів модуляції та кодування, застосування систем MIMO, використання ретрансляторів та сучасних протоколів зв'язку. Ці методи дозволяють забезпечити стабільний та надійний зв'язок на великих відстанях, що є ключовим фактором для ефективної роботи безпілотних літальних апаратів.

### 3.3 Використання методів ретрансляції для покращення дальності зв'язку

Одним із рішень вирішення проблеми дальності зв'язку є використання повітряного ретранслятора, який може підвищити ефективність та дальність використання БПЛА, забезпечуючи стабільний та надійний зв'язок з оператором на великій відстані. Повітряний ретранслятор функціонує як проміжний пункт, який приймає сигнал від БПЛА та передає його далі до оператора, тим самим подовжуючи ефективну дальність зв'язку. Ця технологія дозволяє уникнути втрат сигналу та покращує якість передачі відеоінформації в реальному часі. На рисунку 3.1 зображено, як виглядає зв'язок БПЛА з повітряним ретранслятором та оператором.

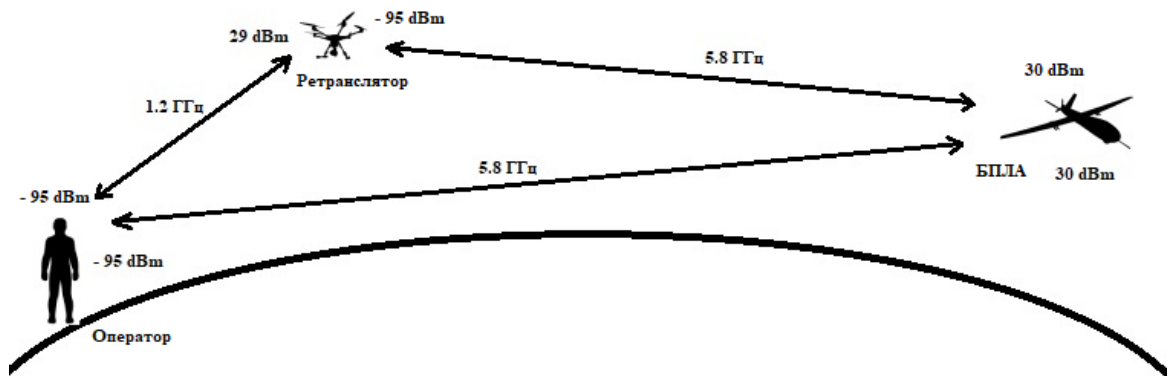


Рисунок 3.1 – Зв'язок БПЛА з повітряним ретранслятором та оператором.

Розробка та впровадження такого повітряного ретранслятора є важливим завданням у галузі розвитку безпілотних технологій. Такий пристрій дає можливість успішного вирішення завдань на відкритих місцевостях, у важкодоступних районах або у зоні дії електромагнітних перешкод. Крім військового застосування, повітряні ретранслятори можуть бути корисні в галузі екстремального туризму або пошукових рятувальних операцій, де вони допоможуть забезпечити безперервний зв'язок з групою у складних умовах.

На сьогодні на ринку є пропозиції, наприклад, відео передавач Matek VTX та відео приймач Matek VRX, які працюють на частоті 1,2 ГГц. І можуть бути використані як складова частина повітряного ретранслятора. Matek VTX є компактним і потужним відеопередавачем, спеціально призначеним для

використання в різних умовах польоту. Основні переваги Matek VTХ включають широкий діапазон частот, високу потужність передачі сигналу, низький рівень спотворень та інтерференції. Ці характеристики роблять його якісним вибором для забезпечення стабільного зв'язку з БПЛА-ретранслятором на великій відстані, що в цілому забезпечить збільшення дальності відеозв'язку із основним керованим БПЛА..

Технічна реалізація такого ретранслятору включає встановлення Matek VTХ на дрон або окремий БПЛА, та налагодження його параметрів, відеосигнал на нього подається, наприклад, від відеоприймача на 5.8 ГГц, який приймає відеосигнал від пристрою на дроні і з яким треба підтримувати зв'язок на великій відстані. Відеоприймач отримує сигнал через антенну від БПЛА, після чого вони декодують його і виводять на вхід МАТЕК VTХ.

Зважаючи на проблему обмеження дальності польоту БПЛА та необхідність якісної передачі відеоінформації, використання повітряного ретранслятора, зокрема Matek VTХ, виявляється важливим кроком у вдосконаленні засобів зв'язку та підвищенні ефективності використання БПЛА.

### 3.4 Проведення розрахунків втрат сигналу при зв'язку з БПЛА

Для проведення розрахунків втрат сигналу при зв'язку з БПЛА, для випадку без використання повітряного ретранслятора та з використанням, використовуємо формулу:

$$A = \frac{P_{\text{пд.}}}{P_{\text{с вх.пр.}}} = \frac{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2}{G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2} \quad (3.4)$$

Для випадку без використання повітряного ретранслятору беремо вихідні дані згідно таблиці 3.1. В цій таблиці, використані параметри чутливості приймача і потужності передавача характерні для обладнання 5.8 ГГц:

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для системи без повітряного ретранслятора

Параметр	Значення	Примітка
Частота	5.8 ГГц	$5.8 \times 10^9$ Гц
Довжина хвилі $\lambda$	0.0517 м	$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{5.8 \times 10^9}$
Коефіцієнт підсилення передавальної антени $G_1$	2 дБ	Типове значення для антени на БПЛА
Коефіцієнт підсилення приймальної антени $G_2$	2 дБ	Типове значення для антени на наземній станції
Коефіцієнт корисної дії передавального фідера $\mu_1$	1	Типове значення
Коефіцієнт корисної дії приймального фідера $\mu_2$	1	Типове значення
Множник ослаблення $\nu$	0.8	Враховуючи атмосферні умови
Передавальний пристрій $P_{\text{пд.}}$	30 dBm	потужність на виході передавального пристрою БПЛА
Приймальний пристрій $P_{\text{с вх.пр.}}$	-95 dBm	Потужність вхідного сигналу приймального пристрою, зокрема МАТЕК VRX

Розрахунок:

Довжина хвилі сигналу може бути виражена через частоту як (3.5):

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{f_c \text{ Гц}} \quad (3.5)$$

Довжина хвилі  $\lambda$  і відстань  $r$  повинні мати одну розмірність (чи метри, чи кілометри). Коефіцієнт підсилення антен із дБ необхідно перевести в рази:

$$G_{\text{дБ}} = 10 \ln G_{\text{раз}}, \text{ звідси } G_{\text{раз}} = 10^{0.1 \times G_{\text{дБ}}} = 10^{0.1 \times 0.2} = 1.58 \text{ раз.}$$

Повні втрати сигналу становлять (3.6):

$$A = \frac{\left(\frac{4\pi r}{c} f_c\right)^2}{G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2} \quad (3.6)$$

Виразимо відстань  $r$  з даної формули 3.7 :

$$r = \frac{c \sqrt{A G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2}}{4\pi f_c} \quad (3.7)$$

Візьмемо  $A$  як:

$$A = 30 - (-95) = 125 \text{ dBm} \quad (3.8)$$

Повні втрати сигналу потрібно перевести із dBm в рази:

$$A_{\text{дБ}} = 10 \ln A_{\text{раз}}, \text{ звідси } A_{\text{раз}} = 10^{0.1 \times A_{\text{дБ}}} = 10^{0.1 \times 12.5} = 3.162 \times 10^{12} \text{ раз.}$$

Знайдемо відстань  $r$ :

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{3.162 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 5.8 \times 10^9} = 9256.18 \text{ метрів} \quad (3.9)$$

$$r = 9256.18 \text{ метрів}$$

Для системи з повітряним ретранслятором будемо розглядати два етапи: від БПЛА до передавача на дроні, і від передавача на дроні до приймача на наземній станції та сумувати, щоб знайти загальну відстань:

$$r_{\text{заг.}} = r_1 + r_2 \quad (3.10)$$

Для випадку від БПЛА до передавача на дроні беремо вихідні дані згідно таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для випадку від БПЛА до передавача на дрон

Параметр	Значення	Примітка
Частота	5.8 ГГц	$5.8 \times 10^9$ Гц
Довжина хвилі $\lambda$	0.0517 м	$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{5.8 \times 10^9}$
Коефіцієнт підсилення передавальної антени $G_1$	2 дБ	Типове значення для антени на БПЛА
Коефіцієнт підсилення приймальної антени $G_2$	2 дБ	Типове значення для антени на наземній станції
Коефіцієнт корисної дії передавального фідера $\mu_1$	1	Типове значення
Коефіцієнт корисної дії приймального фідера $\mu_2$	1	Типове значення
Множник ослаблення $\nu$	0.8	Враховуючи атмосферні умови
Передавальний пристрій $P_{\text{пд.}}$	30 dBm	Чутливість передавального пристрою БПЛА
Приймальний пристрій $P_{\text{с.вх.пр.}}$	-95 dBm	Чутливість приймального пристрою, зокрема МАТЕК VTX

Розрахунок:

Довжина хвилі сигналу може бути виражена через частоту як:

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{f_c \text{ Гц}} \quad (3.11)$$

Довжина хвилі  $\lambda$  і відстань  $r$  повинні мати одну розмірність (чи метри, чи кілометри). Коефіцієнт підсилення антен із дБ необхідно перевести в рази:

$$G_{\text{дБ}} = 10 \ln G_{\text{раз}}, \text{ звідси } G_{\text{раз}} = 10^{0.1 \times G_{\text{дБ}}} = 10^{0.1 \times 0.2} = 1.58 \text{ раз.} \quad (3.12)$$

Повні втрати сигналу становлять:

$$A = \frac{\left(\frac{4\pi r}{c} f_c\right)^2}{G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2} \quad (3.13)$$

Виразимо відстань  $r$  з даної формули:

$$r = \frac{c \sqrt{A G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2}}{4\pi f_c} \quad (3.14)$$

Візьмемо  $A$  як:

$$A = 30 - (-95) = 125 \text{ dBm} \quad (3.15)$$

Повні втрати сигналу потрібно перевести із dBm в рази:

$$A_{\text{дБ}} = 10 \ln A_{\text{раз}}, \text{ звідси } A_{\text{раз}} = 10^{0.1 \times A_{\text{дБ}}} = 10^{0.1 \times 12.5} = 3.162 \times 10^{12} \text{ раз.}$$

Знайдемо відстань  $r$ :

$$r_1 = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{3.162 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 5.8 \times 10^9} = 9256.18 \text{ метрів}$$

$$r_1 = 9256.18 \text{ метрів} \quad (3.16)$$

Для від передавача на дроні до приймача на наземній станції. беремо вихідні дані згідно таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані для випадку від передавача на дроні до приймача на наземній станції

Параметр	Значення	Примітка
Частота	1.2 ГГц	$1.2 \times 10^9$ Гц
Довжина хвилі $\lambda$	0.25 м	$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1.2 \times 10^9}$
Коефіцієнт підсилення передавальної антени $G_1$	2 дБ	Типове значення для антени на БПЛА
Коефіцієнт підсилення приймальної антени $G_2$	2 дБ	Типове значення для антени на наземній станції
Коефіцієнт корисної дії передавального фідера $\mu_1$	1	Типове значення
Коефіцієнт корисної дії приймального фідера $\mu_2$	1	Типове значення
Множник ослаблення $\nu$	0.8	Враховуючи атмосферні умови
Передавальний пристрій $P_{\text{пд.}}$	29 dBm	Чутливість передавального пристрою МАТЕК VTХ

Продовження таблиці 3.3.

Приймальний пристрій $P_{с\text{ вх.пр.}}$	-95 dBm	Чутливість приймального пристрою МАТЕК VRX
--	---------	--

Розрахунок:

Довжина хвилі сигналу може бути виражена через частоту як:

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{f_c \text{ Гц}} \quad 3.17$$

Довжина хвилі  $\lambda$  і відстань  $r$  повинні мати одну розмірність (чи метри, чи кілометри). Коефіцієнт підсилення антен із дБ необхідно перевести в рази:

$$G_{\text{дБ}} = 10 \ln G_{\text{раз}}, \text{ звідси } G_{\text{раз}} = 10^{0.1 \times G_{\text{дБ}}} = 10^{0.1 \times 0.2} = 1.58 \text{ раз.} \quad (3.18)$$

Повні втрати сигналу становлять:

$$A = \frac{\left(\frac{4\pi r}{c} f_c\right)^2}{G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2} \quad (3.19)$$

Виразимо відстань  $r$  з даної формули:

$$r = \frac{c \sqrt{A G_1 G_2 \mu_1 \mu_2 v^2}}{4\pi f_c} \quad (3.20)$$

Візьмемо  $A$  як:

$$A = 29 - (-95) = 124 \text{ dBm} \quad (3.21)$$

Повні втрати сигналу потрібно перевести із dBm в рази:

$$A_{\text{дБ}} = 10 \ln A_{\text{раз}}, \text{ звідси } A_{\text{раз}} = 10^{0.1 \times A_{\text{дБ}}} = 10^{0.1 \times 12.4} = 2.51 \times 10^{12} \text{ раз.} \quad (3.22)$$

Знайдемо відстань  $r$ :

$$r_2 = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.2 \times 10^9} = 39859.7 \text{ метрів}$$

$$r_2 = 39859.7 \text{ метрів} \quad (3.23)$$

Розрахунок загальної відстані:

$$r_{\text{заг.}} = r_1 + r_2$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 39859.7 = 49155.88 \text{ метрів} \quad (3.24)$$

Знайдемо відстань для випадків роботи передавального пристрою на різних частотах каналів, щоб виявити як відстань змінюється в залежності від обраного частотного каналу, всі дані занесені в таблицю 3.4.

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1080 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.08 \times 10^9} = 44288.6 \text{ метрів}$$

$$r = 44288.6 \text{ метрів} \quad (3.25)$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 44288.6 = 53544.78 \text{ метрів}$$

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1120 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.12 \times 10^9} = 42706.8 \text{ метрів}$$

$$(3.26)$$

$$r = 42706.8 \text{ метрів}$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 42706.8 = 51962.98 \text{ метрів}$$

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1160 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.16 \times 10^9} = 41234.2 \text{ метрів}$$

$$r = 41234.2 \text{ метрів}$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 41234.2 = 50490.38 \text{ метрів} \quad (3.27)$$

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1240 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.24 \times 10^9} = 38573.9 \text{ метрів}$$

$$r = 38573.9 \text{ метрів}$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 38573.9 = 47830.08 \text{ метрів} \quad (3.28)$$

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1258 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.258 \times 10^9} = 38022 \text{ метрів}$$

$$r = 38022 \text{ метрів}$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 38022 = 47278.18 \text{ метрів} \quad (3.29)$$

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1280 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.28 \times 10^9} = 37368.5 \text{ метрів}$$

$$r = 37368.5 \text{ метрів}$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 37368.5 = 46624.68 \text{ метрів} \quad (3.30)$$

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1320 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.32 \times 10^9} = 36236.1 \text{ метрів}$$

$$r = 36236.1 \text{ метрів}$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 36236.1 = 45492.28 \text{ метрів} \quad (3.31)$$

Розрахунок відстані на роботі каналу з частотою 1360 МГц:

$$r = \frac{3 \times 10^8 \sqrt{2.51 \times 10^{12} \times 1.58 \times 1.58 \times 1 \times 1 \times 0.8^2}}{4 \times 3.14 \times 1.36 \times 10^9} = 35170.3 \text{ метрів}$$

$$r = 35170.3 \text{ метрів}$$

$$r_{\text{заг.}} = 9256.18 + 35170.3 = 44426.48 \text{ метрів} \quad (3.32)$$

Таблиця 3.4 – Відстань в залежності від використання частотного каналу

Частота, $f_c$ , МГц	Відстань, $r$ , м
1080	53544.78
1120	51962.98
1160	50490.38
1200	49155.88
1240	47830.08
1258	47278.18
1280	46624.68
1320	45492.28
1360	44426.48

На рисунку 3.1 зображено графік на якому показано як змінюється відстань в залежності від обраної частоти.

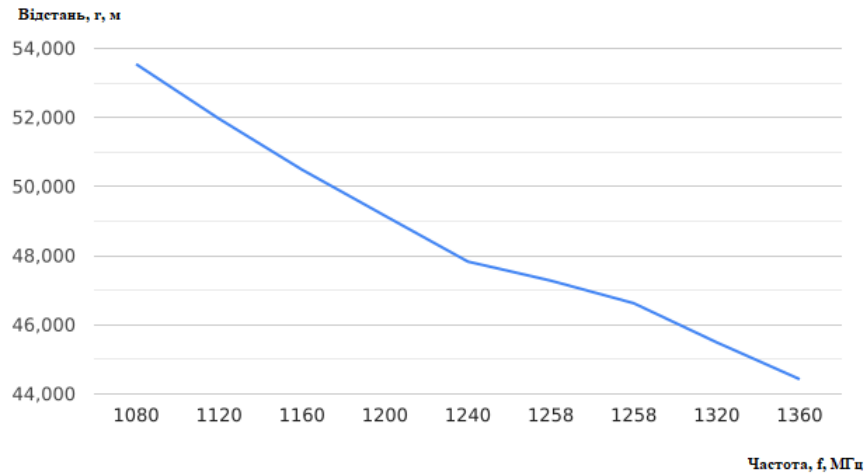


Рисунок 3.2 – Графік залежності відстані від частоти каналу зв'язку «БПЛА-ретранслятор–оператор»

Поділимо загальну відстань з використанням повітряного ретранслятора та без використання, для знаходження ефективності, використання якої системи дає перевагу:

$$R = \frac{49155.88}{9256.18} = 5.3 \quad (3.33)$$

Більше ніж у 5 разів при використанні повітряного ретранслятору збільшується відстань на якій можливо отримувати зв'язок від БПЛА. Згідно з даними таблиці 3.4, використання каналу з нижчою частотою збільшує відстань на якій залишається зв'язок з БПЛА.

### 3.5 Реалізація підключення відео передавача Matek VTX

Відео передавач Matek VTX-1G3SE зображений на рисунку 3.3 може бути використан як складова частина повітряного ретранслятора в парі з відео

приймачем Matek VRX-1G3-V2 зображений на рисунку 3.4. Їх необхідно між собою з'єднати та підключити живлення.

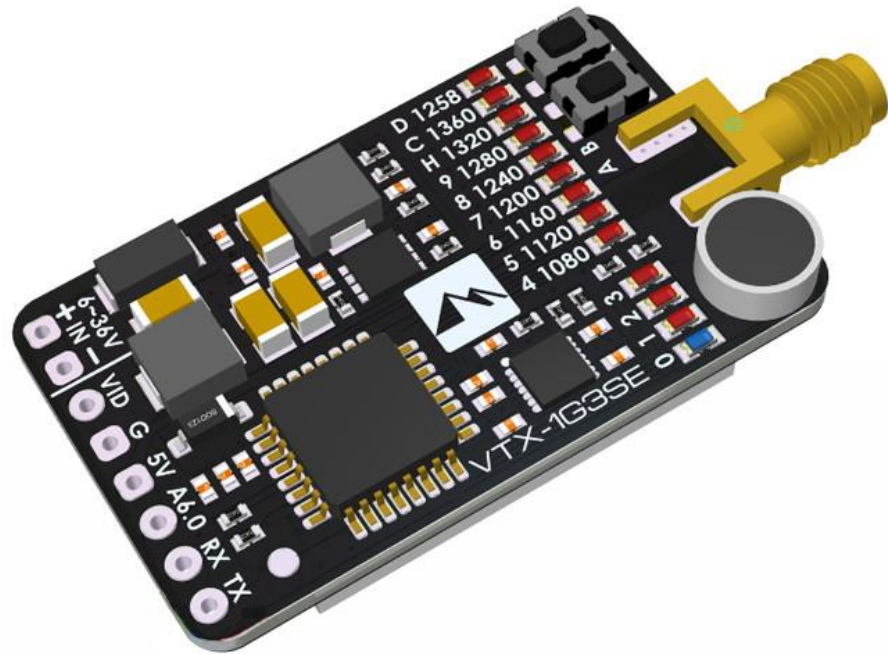


Рисунок 3.3 – Відео передавач Matek VTX-1G3SE

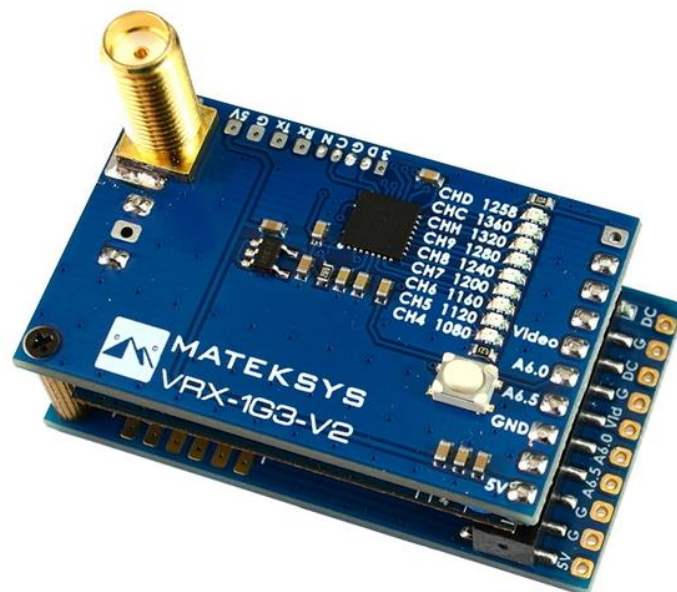


Рисунок 3.4 – Відео приймач Matek VRX-1G3-V2

Не рекомендується використовувати перший канал з частотою 1080 МГц, тому що використання цього каналу збігається з робочою частотою транспондерів ADS-B (1090 МГц) пілотованою авіацією. Транспондери ADS-B – використовуються для розпізнавання корабля в повітрі, а також у системі TCAS сигнального зіткнення в повітрі [17].

Налаштування відеопередавача виконується двома кнопками. Кнопка А відповідає за встановлення потужності передачі. Після обрання необхідної потужності, натискається і утримується кнопка В протягом 2 секунд, що дає увійти до налаштування частоти. Індикатор частоти почне блимати, та необхідно натиснути кнопку В, для вибрати. Поки світлодіод блимає передавач в цей час не працює, нова частота і передача будуть активовані, якщо протягом 3 секунд не буде натиснуто жодної кнопки.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі було розглянуто класифікації БПЛА та технічні характеристики їхніх каналів управління та передачі інформації. Визначення різновидів БПЛА за призначенням, дальністю і тривалістю польоту, а також за дальністю зв'язку, що дозволяє зрозуміти широкий спектр їхнього застосування та вимоги до систем зв'язку. Ці дані є важливими для розробки комплексної системи повітряного ретранслятора, яка включатиме передавачі, приймачі та канали передачі відеоінформації. Розглянуто технічні характеристики, такі як частотний діапазон, потужність передачі, тип модуляції та рівень інтерференції, що допоможе визначити оптимальні параметри ретранслятора для забезпечення надійного зв'язку. Знання про класифікацію БПЛА та їхні вимоги до зв'язкових систем допоможуть визначити, які саме технічні рішення потрібно використовувати для забезпечення стабільного і якісного зв'язку на великих відстанях, таким чином, розуміння класифікації БПЛА та особливостей їхніх каналів зв'язку є основою для визначення технічних вимог до компонентів повітряного ретранслятора, що є необхідним для його ефективного проектування та впровадження.

У другому розділі проведено аналіз технологій зв'язку для БПЛА, який надає всебічне розуміння різноманітних технологічних рішень, що можна використовувати для розробки повітряного ретранслятора. Важливість цього аналізу полягає в тому, що дозволяє визначити оптимальні підходи до забезпечення стабільного та надійного зв'язку між оператором та БПЛА, враховуючи специфічні вимоги та обмеження кожної технології. Розробка повітряного ретранслятора для зв'язку з БПЛА вимагає комплексного підходу, який включає вибір оптимальних технологій зв'язку, методів кодування та модуляції сигналів. Ці знання дозволяють створити ефективний та надійний пристрій, здатний забезпечити стабільний зв'язок на великих відстанях та у складних умовах експлуатації.

У третьому розділі було проведено аналіз дальності зв'язку з БПЛА, а саме розгляд ключових факторів, які визначають ефективність і стабільність зв'язку. Визначено, що впливає на втрати сигналу при поширенні радіохвиль у реальних умовах, та запропоновано використання повітряного ретранслятора, який може підвищити ефективність та дальність використання БПЛА, забезпечуючи стабільний та надійний зв'язок з оператором на великій відстані. Повітряний ретранслятор функціонує як проміжний пункт, який приймає сигнал від БПЛА та передає його далі до оператора, тим самим подовжуючи ефективну дальність зв'язку. Було зроблено розрахунки втрат сигналу при зв'язку з БПЛА, для випадку без використання повітряного ретранслятора та з використанням, більше ніж у 5 разів при використанні повітряного ретранслятора збільшується відстань на якій можливо отримувати зв'язок від БПЛА, а також знайдено, що використання каналу з нижчою частотою збільшує відстань на якій залишається зв'язок з БПЛА. Запропоновано використання відеопередавач Matek VTX-1G3SE, описано його характеристики та спосіб налаштування.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Що таке БПЛА: які вони бувають і де використовуються [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://technoveru.com/chto-takoe-bpla-kakie-oni-byvayut-i-gde-ispolzuyutsya/>.
2. Узагальнена класифікація безпілотних літальних апаратів / Корченко О. Г., Ілляш О. С. / Збірник наукових праць. Харківський університет Повітряних сил. 2012. № 4 (33)
3. Способы ретрансляции сигналов в ррл с чрк [Электронный ресурс]. –2015. – Режим доступа до ресурсу: <https://studfiles.net/preview/2082496/>.
4. Филимонов А.Ю. Построение мультисервисных сетей Ethernet. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 592 с.
5. International Civil Aviation Organization. (2005). Global Air Traffic Management Operational Concept . Doc. ICAO Doc 9854-AN/458. Canada, Montreal: Author.
6. International Civil Aviation Organization. (2009). Manual on Global Performance of the Air Navigation System. Doc. ICAO 9883. Canada, Montreal: Author.
7. International Civil Aviation Organization. (2015). Manual of Remoted Piloted Aircraft Systems (RPAS). Doc. ICAO 10019/AN 507. Canada, Montreal : Author.
8. Sitharama I.S. Distributed Sensor Networks, Second Edition: Image and Sensor Signal Processing / Sitharama Iyengar S., Richard R. – USA: CRC Press, 2012. – 764 p.
9. Жук О.В. Система управління тактичними сенсорними мережами / Жук О.В., Романюк В.А., Сова О.Я. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 2. – С. 88 – 96.
10. Tactical Reconnaissance: Uavs Versus Manned Aircraft / Rajesh Kumar / The Pennsylvania State University. – 1997
11. Безпілотний літальний апарат: що таке БПЛА та які вони бувають [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://spec-rental.com.ua/ru/chto-takoe-bpla/>.

12. Усенко, А. М. Проблеми передачі відеосигналу з безпілотних літальних апаратів. Журнал телекомунікаційних технологій. – 2018. – №1. – С. 34-39.
13. Калиненко, С. О. Використання інноваційних технологій у системах зв'язку з безпілотними літальними апаратами. Науковий вісник Київського національного університету. – 2020. – №4. С. 33-37
14. Савченко, Л. М. Використання антенних систем для збільшення дальності зв'язку з БПЛА. Збірник наукових праць Інституту радіоелектроніки. – 2018. – №2. – С. 89-93.
15. Климчук, Ю. Системи ретрансляції для безпілотних літальних апаратів. Журнал авіаційних технологій. – 2020. – №1. – С. 25-30.
16. Цимбалюк, В. Г. Вплив погодних умов на зв'язок з безпілотними літальними апаратами. Вісник Одеського національного університету. – 2019. – №3. – С. 55-60.
17. Передатчик Matek System VTX [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://rcdrone.top/ru/products/matek-system-vtx-1g3se-9-transmitter>.