

Міністерство освіти та 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)

Аналіз антенного устаткування для управління БПЛА  
(тема)

Виконав:

здобувач 2 курсу, групи ІМІм-24-1

Борозняк Д.С.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Електронні комунікації  
та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(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)

Микола МОСКАЛЕЦЬ  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Не містить відомостей, заборонених  
до відкритого публікування

Керівник \_\_\_\_\_ /С.А. Іваненко

Здобувач \_\_\_\_\_ / Д.С. Борозняк

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Інфокомунікацій \_\_\_\_\_  
(повна назва)  
Кафедра \_\_\_\_\_ інформаційно-мережної інженерії \_\_\_\_\_  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 172 Електронні комунікації та радіотехніка \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Інформаційно мережна інженерія \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

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

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачу \_\_\_\_\_ Борозняку Денису Сергійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз антенного устаткування для управління БПЛА»  
затверджені наказом ВНЗ від “24” \_\_10\_\_ 2025 р. №959Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 24.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Розглянути загальні характеристики та класифікацію антенного устаткування, конструктивні особливості та технічні характеристики. Розглянути комерційне антенне устаткування, яке присутнє на ринку. Розробити антенне устаткування для МАТЕКСYS 1200

4. Перелік запитань, що необхідно опрацювати в роботі

1) Аналіз особливостей застосування БПЛА та проблеми їх експлуатації

2) Аналіз частотних діапазонів каналів зв'язку із БПЛА

3) Аналіз антенного устаткування для управління БПЛА

4) Розробка антенного устаткування для відеоканалу БПЛА

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	25.10.25	
2	Підбір літератури за темою роботи.	30.10.25	
3	Виконання розділу 1	10.11.25	
4	Виконання розділу 2	15.11.25	
5	Виконання розділу 3	20.11.25	
6	Виконання розділу 4	28.11.25	
7	Оформлення презентаційного матеріалу	05.12.25	
8	Підготовка до захисту ЕК.	23.12.25	

Дата видачі завдання 25 10 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 81 с., 34 рис., 11 табл., 25 формул, 15 джерел, 2 додатки

Об'єкт дослідження – Антенне устаткування для управління БПЛА.

Мета роботи – Визначити основні технічні характеристики антен, які практично затребувані, провести аналіз недоліків антенного обладнання присутнього на ринку.

У кваліфікаційній роботі проведений детальний аналіз антенного устаткування для управління БПЛА. Розглянуті технічні аспекти бездротових каналів зв'язку, що використовуються для управління БПЛА, виділені їх особливості та описані моделі розповсюдження радіохвиль.

Вироблені рекомендації щодо застосування різних типів антен в залежності від типу БПЛА та для різних сценаріїв їхнього використання

В роботі розроблена антенна система, яка на меті поставлена покращити експлуатаційні характеристики відеосистеми MATEKSYS 1200 і позбавлена притаманних недоліків інших типів комерційних антен.

БПЛА, АНТЕНА, FPV, MATEKSYS, VTX, KCX, БІКВАДРАТ, GROUND PLANE

## THE ABSTRACT

Explanatory note: 81 p., 34 fig., 11 tabl., 25 form., 15 sources, 2 ap.

Object of research – Antenna equipment for UAV control

Purpose of work – To determine the main technical characteristics of antennas that are in practical demand, to analyze the shortcomings of antenna equipment present on the market.

The qualification work provides a detailed analysis of antenna equipment for UAV control. The technical aspects of wireless communication channels used for UAV control are considered, their features are highlighted, and radio wave propagation models are described.

Recommendations are made for the use of different types of antennas depending on the type of UAV and for different scenarios of their use

The work developed an antenna system that aims to improve the operational characteristics of the MATEKSYS 1200 video system and is devoid of the inherent disadvantages of other types of commercial antennas.

UAV, ANTENNA, FPV, MATEKSYS, VTX, KSH, BIKVADRAT, GROUND PLANE

## ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	9
ВСТУП .....	10
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ТА ПРОБЛЕМИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ. ....	11
1.1 Галузі застосування БПЛА.....	11
1.2 Проблеми розробки та експлуатації БПЛА .....	12
2 АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ БПЛА .....	18
2.1 Аналіз каналів зв'язку FPV БПЛА .....	18
2.2 Аналіз частотних діапазонів каналів керування БПЛА .....	18
2.3 Аналіз частотних діапазонів відеоканалу FPV БПЛА .....	18
2.4 Особливості розповсюдження радіохвиль діапазонів керування БПЛА .....	21
2.5 Моделі розповсюдження радіохвиль.....	24
3 АНАЛІЗ АНТЕННОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БПЛА .....	27
3.1 Характеристики антен.....	27
3.2 Класифікація антен.....	27
3.3 Рекомендації щодо обрання типу антен в залежності від сценаріїв використання та типу БПЛА.....	27
3.4 Особливості розташування антенного устаткування на БПЛА.....	31
3.5 Проблеми якості комерційного антенного обладнання. ....	31
4 РОЗРОБКА АНТЕННОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВІДЕОКАНАЛУ БПЛА ...	49
4.1 Аналіз комплектного антенного устаткування системи відеозв'язку МАТЕКСYS.....	49
4.2. Розробка спрямованої антени на частоту 1200 МГц .....	49
4.3 Розробка всеспрямованої антени на частоту 1200 МГц.....	51
4.4 Практичне виготовлення розроблених антен. ....	53
4.5 Оцінка ефективності розробленої антенної системи.....	53
ВИСНОВКИ .....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	60
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ .....	62

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

**FPV** – управління від першої особи;

**VHF** – дуже високі частоти;

**UHF** – ультра високої частоти;

**SHF** – супервисокі частоти.

**RHCP** – правостороння кругова поляризація;

**LHCP** – лівостороння кругова поляризація;

**VTX** – відеопередавач;

**VRX** – відеоприймач.

**ДС** – діаграма спрямованості;

**БПЛА** – безпілотні літальні апарати

**УВЧ** – ультрависокі частоти;

**НВЧ** – надвисокі частоти

**НВЧ**– надвисокі частоти;

**МСЕ** – Міжнародний Союз Електрозв'язку;

**АЧХ** – амплітудо-частотна характеристика

**КСХ** – коефіцієнт стоячої хвилі;

**ККД** – коефіцієнт корисної дії;



## ВСТУП

Безпілотні літальні апарати стали важливою складовою сучасного життя, а їхні можливості вражають: дрони можуть виконувати картографування, проводити пошукові операції, забезпечувати доставку вантажів та виконувати оборонні завдання. Ця технологія має величезний потенціал для різних сфер людської діяльності, хоча й має певні технічні обмеження, які не дозволяють її застосувати в деяких випадках.

Оскільки БПЛА (БПЛА) здебільшого керуються за допомогою бездротових технологій, одним із основних недоліків є обмежена дистанція управління, що стає критичним, навіть коли вирішено питання з автономним живленням.

Цю проблему можна пояснити діапазонами частот, що використовуються в каналах зв'язку з БПЛА. Найчастіше це ультракороткохвильовий діапазон, для якого характерно, що хвилі можуть передаватися тільки на відстань прямої видимості, без здатності огинати перешкоди або земну поверхню.

Однак велику роль в забезпеченні необхідного рівня сигналу відіграє саме антенне устаткування. Але, як показує практика, велика кількість операторів дуже наближено розуміє принцип роботи антенного устаткування та загальну теорію антен, що в середньому погіршує результати експлуатації БПЛА.

Значну плутанину під час оснащення БПЛА антенами вносить їх велике різноманіття на ринку, що тільки ускладнює обрання необхідного типу антен для вирішення конкретних задач.

Тому в роботі пропонуються певні рекомендації щодо обрання антен для різних сценаріїв використання БПЛА.

Крім того в практичній частині пропонується розробка комплекту антен для БПЛА літакового типу.

Дослідження, проведені в роботі, мають теоретичне обґрунтування, а запропоновані рішення базуються на конкретних технічних пристроях.

# 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ТА ПРОБЛЕМИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

## 1.1 Галузі застосування БПЛА

БПЛА набули широкого застосування в різноманітних галузях людської діяльності, зокрема:

1. Туризм і розваги: БПЛА використовуються для аерофотозйомки, організації екскурсій та створення відеоконтенту, включаючи кінематографічні зйомки для туристичних агентств та кінопродукції.

2. Цивільна авіація: вони застосовуються для екологічного моніторингу, картографування, а також для здійснення спостереження за морськими та лісовими територіями з метою оцінки природних ресурсів.

3. Медицина: дрон-технології використовуються для доставки медичних матеріалів, таких як кров або медикаменти, у важкодоступні райони, зокрема в умовах катастроф або під час надзвичайних ситуацій.

4. Сільське господарство: БПЛА дозволяють здійснювати дистанційний моніторинг стану сільськогосподарських культур, проводити оцінку врожайності та здійснювати аерозольне розпилення пестицидів та добрив.

5. Доставка вантажів. Використання дронів для транспортування малогабаритних вантажів забезпечує високу ефективність та оперативність доставки в межах міських та віддалених районів.

6. Пожежна безпека. Безпілотники застосовуються для раннього виявлення та моніторингу пожеж, а також для організації оперативного реагування в зонах надзвичайних ситуацій.

7. Пошуково-рятувальні операції. БПЛА активно використовуються для виявлення потерпілих та пошуку зниклих осіб у складних умовах, таких як природні катастрофи або техногенні аварії.

8. Наукові дослідження. Дрони дозволяють проводити дослідження в умовах, що є недоступними або небезпечними для людини, зокрема на вулканах, в океанах або в умовах екстремальних кліматичних зон.

9. Екологічний моніторинг. Безпілотні апарати забезпечують моніторинг екологічної ситуації, включаючи виявлення забруднення довкілля, вимірювання рівня забруднення атмосферного повітря та водних ресурсів.

10. Військова сфера. У військових операціях БПЛА застосовуються для виконання розвідувальних завдань, спостереження за ворожими об'єктами, а також для точкового ураження цілей.

Ці технології мають великий потенціал для подальшого розвитку, оскільки забезпечують високу ефективність, точність і безпеку в різних сферах, від цивільних до спеціалізованих застосувань.

На даний час, в Україні важко перебільшити роль БПЛА: вони активно використовуються як для пошуково-рятувальних операцій так і охорони державного кордону.

## 1.2 Проблеми експлуатації БПЛА

Хоча БПЛА мають безліч переваг, таких як підвищення безпеки для операторів, можливість працювати в умовах, небезпечних для людей, і зниження експлуатаційних витрат, існують певні недоліки, які обмежують їх ефективність і якість виконання завдань. До таких недоліків можна віднести низку технічних та операційних обмежень, що розглянуті нижче.

### 1.2.1 Обмеження часу польоту

Одна з основних технічних проблем, з якими стикаються користувачі БПЛА, полягає в обмеженій тривалості польоту. Більшість комерційно доступних моделей мають обмежений час автономної роботи через обмежену ємність акумуляторів або пального. Це може стати серйозним обмеженням для виконання довготривалих місій, таких як моніторинг великих територій або проведення

комплексних наукових досліджень, що потребують тривалої роботи в повітрі. Відсутність достатньої автономності може вимагати частих перезарядок або дозаправок, що збільшує витрати часу та знижує ефективність використання БПЛА для деяких завдань. З метою подолання цієї проблеми активно розробляються нові технології акумуляторів, а також альтернативні джерела енергії, як-от сонячні батареї або вдосконалені паливні елементи.

### 1.2.2 Залежність від надійних систем навігації та комунікацій

Іншою важливою технічною проблемою є необхідність наявності високонадійних систем для навігації та зв'язку. БПЛА часто використовують системи GPS або інерціальні навігаційні пристрої, які забезпечують точність позиціонування та орієнтацію під час польоту. Однак будь-який збій у роботі цих систем може призвести до серйозних проблем з керуванням та безпекою апарата. У разі втрати сигналу GPS, дрон може втратити свою орієнтацію, що підвищує ризик аварії або втрати апарата. Такі випадки особливо небезпечні в складних умовах, наприклад, в густо забудованих районах, де сигнал може бути сильно ослаблений, або у гірських районах, де точність навігації критична. Задля вирішення цих проблем розробляються системи резервної навігації, які дозволяють забезпечити стабільність та безпеку польотів навіть за відсутності або зниженні якості сигналу GPS.

### 1.2.3 Обмежена дистанція управління

Одна з найбільших проблем, що впливає на ефективність використання БПЛА, — це обмежена дистанція управління, що виникає через фізичні обмеження розповсюдження радіохвиль, які використовуються для зв'язку з безпілотниками. Здебільшого БПЛА працюють на частотах ультракоротких хвиль (UHF) або інших радіочастотах, що мають обмежену здатність до проникнення через перешкоди або досягнення великих відстаней. Оскільки радіохвилі цієї частоти здатні розповсюджуватись тільки в межах прямої видимості, а також не огинають перешкоди, відстань, на яку можна безпечно управляти дроном,

обмежена. Це створює значні труднощі при виконанні завдань на великих територіях або в складних умовах (наприклад, у гірських районах, містах з великою щільністю будівель).

#### 1.2.4. Можливі рішення для покращення дистанції управління

На відміну від перших двох проблем (часу польоту і надійності навігації), збільшення дистанції управління вимагає комплексних підходів і нових технологічних рішень. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання технологій супутникового зв'язку, які дозволяють передавати сигнали на значно більші відстані порівняно з традиційними радіочастотними каналами. Встановлення виносних приймачів або ретрансляторів, що дозволяють збільшити зону покриття сигналом, також є ефективним рішенням для збільшення дистанції управління.

Але окреме місце займає правильний вибір та експлуатація, а також вдосконалення антенних систем. Ці дії можуть підвищити ефективність передачі радіосигналу та зменшити перешкоди від інших джерел випромінення, як навмисних так і ненавмисних. І, як наслідок, стає можливість отримати більш стабільний зв'язок на великих відстанях.

## 2 АНАЛІЗ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ БПЛА

### 2.1 Огляд каналів зв'язку 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 до БПЛА, щоб останній міг виконувати різноманітні корисні дії, які необхідні в рамках вирішуваних задач та завдань. Через нього передаються команди пілотування, телеметрія, статус систем і службова інформація.

Відеоканал слугує для передачі відеосигналу від БПЛА до оператора, це дозволяє орієнтувати дрон у просторі для виконання завдань та отримання інформації щодо об'єктів, місцевості, тощо.

### 2.2 Аналіз каналу управління БПЛА

Ось переписаний, стилістично вирівняний і більш плавний варіант тексту:

Сигнали управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) охоплюють різні типи команд, що дають змогу оператору або бортовому програмному забезпеченню контролювати рух та роботу апарата. Канал управління забезпечує передавання таких команд:

- Команди керування польотом – відповідають за зміни швидкості, курсу, висоти та інших параметрів руху БПЛА;
- Команди для керування корисним навантаженням: команди для камер, сенсорів чи інших виконавчих механізмів, які активуються або спрямовуються для збору даних чи виконання певних завдань;
- Команди безпеки та аварійного реагування: до них належать команди аварійного приземлення, відновлення зв'язку або повернення до початкової точки зльоту;
- Маршрутні команди: використовуються, якщо БПЛА має виконувати певну місію або слідувати заданому маршруту;
- Команди взаємодії з іншими системами: у складних системах, наприклад у «роях», можуть передаватися команди координації та взаємодії між кількома БПЛА або іншими елементами системи;

Сигнали управління можуть передаватися за допомогою радіоканалу, супутникових систем або інших засобів зв'язку — вибір залежить від типу БПЛА та характеру його місії. У цій роботі розглядатиметься прямий канал взаємодії між оператором і БПЛА.

Для організації такого зв'язку застосовуються різноманітні системи управління, зокрема рішення від популярних виробників, таких як FrSky, TBS Crossfire, ELRS та інші [1,2,3].

У табл. 2.1 наведені основні технічні характеристики популярних сучасних систем управління БПЛА

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 видно з аналізу, більшість систем управління використовують діапазон близько 900 МГц як універсальне рішення, що поєднує достатню дальність роботи з порівняно низьким завантаженням ефіру.

Особливої уваги заслуговує лінійка обладнання TBS Crossfire.



Рисунок 2.2 – TBS Crossfire



Crossfire (CRSF) — це високопродуктивний радіопротокол передачі даних, розроблений компанією Team BlackSheep. Він зарекомендував себе як надійний інструмент для якісного радіоуправління й здобув значну популярність у спільноті FPV-пілотів.

Основні характеристики та переваги системи Crossfire [3]:

1. Велика робоча дальність: система здатна підтримувати стабільний зв'язок на значних дистанціях, що є важливою перевагою для FPV-застосувань.

2. Мала затримка сигналу: протокол забезпечує швидку передачу даних, що є критичним для точного керування в режимі реального часу.

3. Моніторинг якості зв'язку (LQ): дозволяє оператору відстежувати стабільність каналу у режимі онлайн і своєчасно реагувати на зміни умов зв'язку.

4. Адаптивна швидкість передачі даних: система автоматично коригує параметри передачі залежно від умов, забезпечуючи оптимальний баланс між дальністю та швидкодією.

5. Вбудована телеметрія: завдяки двосторонньому зв'язку користувач може отримувати різні телеметричні дані безпосередньо на пульт керування через протокол Crossfire.

6. Широка сумісність: передавачі та приймачі Crossfire підтримують інтеграцію з популярними пультами, зокрема тими, що працюють на прошивках OpenTX та подібних системах.

7. Різноманітність формфакторів: доступні компактні мікро- та нано-приймачі, що дозволяє оптимізувати вагу та габарити обладнання відповідно до потреб користувача.

Отже, результати аналізу свідчать, що більшість сучасних систем управління FPV-БПЛА функціонують у частотних діапазонах приблизно від 800 МГц до 2.4 ГГц.

### 2.3 Аналіз відеоканалу FPV БПЛА

До складу системи передавання відеозображення входять камера, відеопередавач та приймач сигналу з дисплеєм у вигляді FPV-окулярів або

монітора. Передача відео може здійснюватися як у цифровому, так і в аналоговому форматі.

Цифрові системи застосовуються переважно тоді, коли необхідна висока якість зображення, підвищена роздільна здатність та можливість збереження даних у цифровому вигляді. Серед них особливо вирізняється система відеозв'язку DJI FPV, яка має порівняно низьку затримку та добре підходить для керування апаратами на високих швидкостях.

Аналогові системи відеопередачі з'явилися раніше та базуються на стандартах PAL і SECAM. Вони й досі широко використовуються у FPV-середовищі завдяки двом ключовим перевагам :

- дуже мала затримка сигналу;
- поступове, а не різке погіршення якості зображення при зниженні рівня сигналу, що зменшує ризик раптової втрати керування.

Серед популярних виробників аналогового FPV-обладнання можна назвати MATEK, SKYZONE, АКК та інші. Завдяки підтримці стандартів PAL і SECAM як передавачами, так і приймачами та відеокамерами, обладнання різних брендів зазвичай сумісне між собою та може комбінуватися без проблем. Це є додатковою перевагою аналогових рішень порівняно з цифровими, де передавач і приймач зазвичай працюють лише у межах однієї фірмової системи.

До недоліків аналогових систем можна віднести необхідність використання окремого пристрою для запису відео. А також те, що такий стандарт відеозв'язку має невисоку роздільну здатність, що особливо актуально для деталізованих видів місцевості, рятувально-пошукових робіт, картографування, тощо. В табл. 2.2 наведені основні характеристики FPV відеосистем.

Таблиця – 2.2 наведені основні характеристики FPV відеосистем.

Система	DJI FPV	AKK 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

Для передачі відеозображення в FPV-БПЛА застосовуються різні частотні діапазони УКХ. Як видно з матеріалу цього розділу, переважна більшість каналів зв'язку — як відео, так і керування — працює саме в діапазонах УВЧ-НВЧ в межах приблизно від 800 до 5800 МГц.

Для кращого розуміння особливостей поширення радіохвиль у цьому діапазоні в наступному підрозділі подано відповідний аналіз.

## 2.2 Особливості розповсюдження радіохвиль

Радіохвилі УВЧ-НВЧ мають деякі специфічні особливості розповсюдження в просторі, які варто враховувати під час їхнього використання.

Як і більшість радіохвиль інших діапазонів вони також підвладні впливу дифракції, поглинання та в меншому ступені рефракції.

Радіохвилі УВЧ–НВЧ діапазонів здатні певною мірою проходити крізь перешкоди, такі як стіни чи будівлі. Ступінь проникнення залежить від властивостей матеріалу та сили сигналу. Водночас у вільному просторі хвилі цих

частот поглинаються значно сильніше, ніж сигнали нижчих діапазонів, тому для передавання на великі відстані зазвичай потрібна вища потужність передавачів.

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

Важливою умовою забезпечення надійного зв'язку в УВЧ–НВЧ діапазонах є наявність прямої видимості між передавальною та приймальною антенами (рис. 2.4). Радіохвилі цих діапазонів переважно поширюються прямолінійно, тому будь-які перешкоди на їхньому шляху призводять до зниження рівня сигналу.

Для наближеної оцінки можливості безперешкодного поширення радіохвиль використовується поняття відстані прямої видимості — це дистанція, на якій пряма лінія між передавачем і приймачем лише торкається поверхні Землі, що моделюється за допомогою її еквівалентного радіуса.  $R_e$  [4].

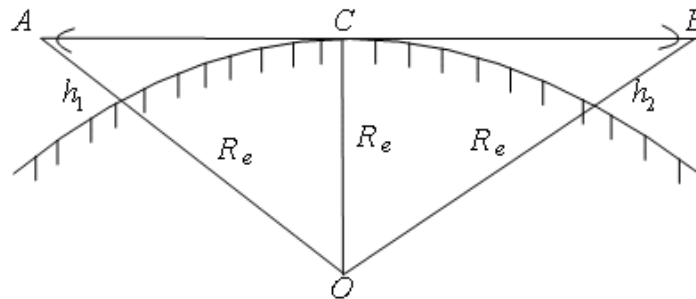


Рисунок 2.3 – Визначення відстані прямої видимості

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

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

При стандартній рефракції

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

Для частот, на яких відбувається управління БПЛА слід застосовувати (2.4). Оскільки радіохвилі діапазону 800–5800 МГц практично не здатні поширюватися за межі видимого горизонту та майже не зазнають атмосферної рефракції, їхнє розповсюдження обмежується переважно прямою видимістю.

Водночас відстань прямої видимості не є достатньою умовою для гарантованого встановлення зв'язку. На шляху проходження сигналу можуть знаходитися різноманітні перешкоди, які зменшують рівень корисного сигналу та погіршують якість зв'язку.

На площині істотна область являє собою еліпс із фокусами в точках  $A$  і  $B$  (рис. 2.4).

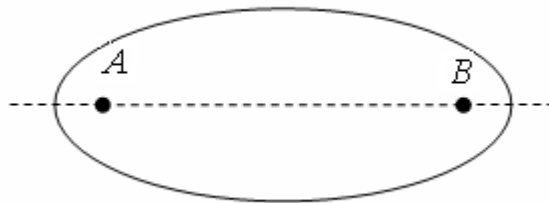


Рисунок 2.4 – Суттєва область на площині

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  $\rho$  [4].

Крім істотної області й області першого еліпсоїда Френеля при розрахунку радіоліній використовується поняття мінімальної області поширення радіохвиль. При цьому  $E_{\min} = E_0$  [4].

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. 2.5).

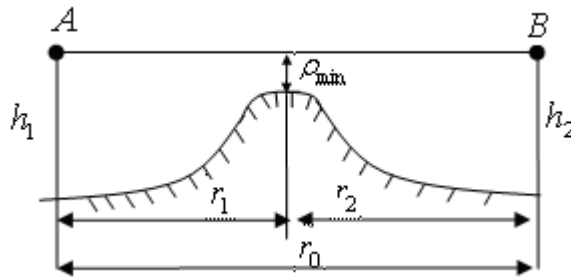


Рисунок 2.5 – До визначення радіуса мінімальної суттєвої області

Для забезпечення стійкого зв'язку необхідно вибрати висоти підвісу антен  $h_1$  і  $h_2$  такими, щоб провіт між найвищою точкою перешкоди й лінією  $AB$  був більше або дорівнював  $\rho_{\min}$  [4].

## 2.5 Моделі розповсюдження радіохвиль

Для оцінювання потенційної дальності зв'язку між оператором і БПЛА необхідно враховувати широкий набір факторів, що визначають втрати сигналу під час його поширення й формують так званий енергетичний бюджет радіолінії. Для розв'язання цього завдання доцільно використовувати напрацьовані моделі та підходи, розроблені для систем стільникового зв'язку, адже їхня структура та умови роботи значною мірою подібні до до сценарію радіоканалу «оператор—БПЛА».

У такій аналогії роль абонентської станції виконує оператор дрона, а роль базової станції — сам БПЛА. Єдина відмінність полягає в тому, що безпілотник може перебувати в русі, тоді як оператор зазвичай залишається нерухомим. Проте в моменти зависання апарата умови практично повністю відповідають типовій ситуації стільникової мережі. Саме тому теоретичні моделі, створені для мобільного зв'язку, можуть ефективно застосовуватися і для оцінювання радіолінії БПЛА.

Найбільшого застосування для оцінювання втрат сигналу під час поширення радіохвиль набули моделі Окамури–Хата, COST231–Хата та Еріксона 9999. Їхня популярність зумовлена універсальністю щодо типів місцевості, відносною простотою застосування та достатньо високою точністю, оскільки ці моделі базуються на аналітичних виразах, отриманих шляхом апроксимації великого масиву емпіричних даних.

Для ознайомлення з параметрами застосовності зазначених моделей у таблиці 2.3 наведено відповідні діапазони та умови використання.

Таблиця 2.3 – Параметри застосовності 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 [5].

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 [5].

Розрахунок втрат на трасі в міських умовах здійснюється наступним чином [5]:

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

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

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

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

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

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

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

Для великих міст

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

Для малих та середніх міст

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

Розрахунок втрат для передмістя [5,6] ведеться за формулою



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

В випадку відкритої та сільської місцевості

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

$k = 40.98$  – 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 (2.7) справедлива і для протяжної траси  $R = 20$  км  $< R < 100$  км, якщо коефіцієнт  $k$  вибрати із умови [4]:

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

Область використання (2.7) можна розширити до діапазону 2000 МГц. Це зроблено в моделі, яка носить назву COST 231-Hata Model (модифікована модель Хата) міські втрати поширення радіохвиль у місті  $L_M$  визначаються формулою [4]:

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

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

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

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

Для втрат в передмісті

$$L_{\text{передмістя}} = L_M - 2 \left( \lg \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4. \quad (2.14)$$

Для втрат в сільській місцевості

$$L_{\text{село}} = L_M - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 35,94. \quad (2.15)$$

Втрати на відкритому просторі

$$L_{\text{відкритий}} = L_M - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94. \quad (2.16)$$

Як показав аналіз джерела [7,8] – результати розрахунків за моделлю Еріксона 9999 для сільської місцевості викликають певні сумніви щодо їхньої достовірності, оскільки відкрита місцевість взагалі не передбачена цією моделлю. Хоча саме вона потенційно могла б бути корисною для оцінювання втрат у діапазоні 5.8 ГГц, на відміну від моделей Окамура–Хата та COST231–Хата, які мають відповідні частотні обмеження для застосування у відеоканалах.

У той же час саме відкрита місцевість є найбільш важливою з практичної точки зору, оскільки саме в таких умовах БПЛА використовуються найчастіше. Тому, попри вказані обмеження, доцільно застосувати модель COST231–Хата для розрахунків втрат у діапазоні 5.8 ГГц, використовуючи певні обґрунтовані припущення.

## 3 АНАЛІЗ АНТЕННОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БПЛА

### 3.1 Характеристики антен

Антенна є доволі складним технічним пристроєм, який має цілу сукупність параметрів.

Для того, щоб об'єктивно провести аналіз антенного устаткування, розглянемо базові технічні характеристики антен.

Антенна – пристрій, призначений для перетворення енергії струму високої частоти в енергію радіохвиль або, навпаки, енергії радіохвиль в енергію струму високої частоти.

Зазначимо деякі основні параметрами антен:

- діаграма спрямованості;
- коефіцієнт підсилення;
- коефіцієнт стоячої хвилі
- хвильовий опір в точці живлення;
- смуга пропускання.

Діаграма спрямованості — це графічне відображення амплітудної характеристики спрямованості антени. Зазвичай діаграми спрямованості (ДС) будують у двох основних площинах: горизонтальній (H-площина) та вертикальній (V-площина). Площини вибирають так, щоб в одній із них розташовувався вектор електричного поля  $E$ , а в іншій — магнітного поля  $H$ .

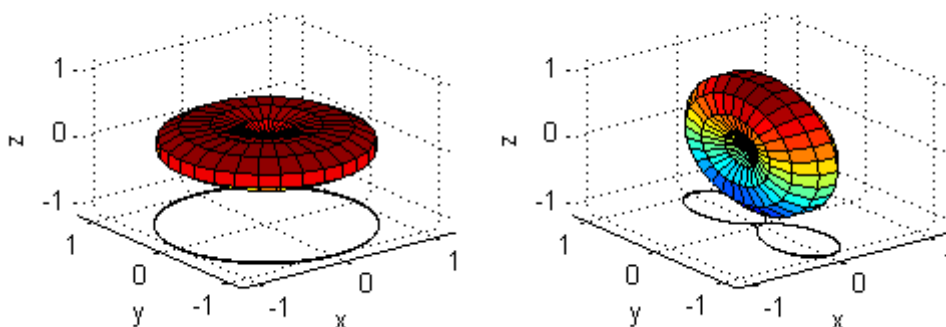
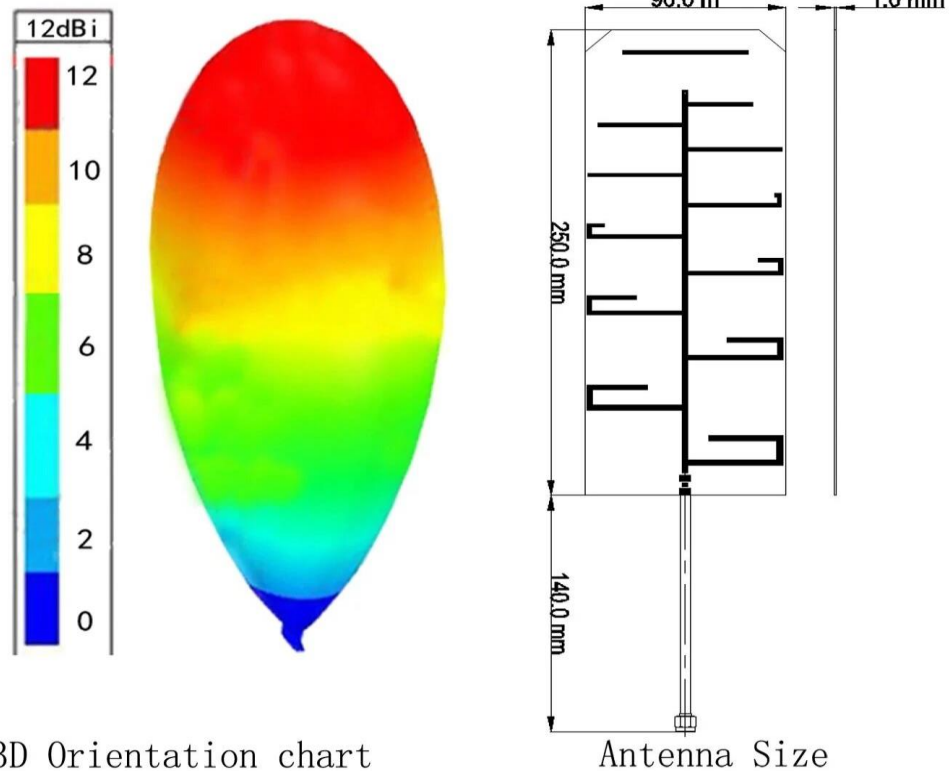


Рисунок 3.1 – Діаграма спрямованості штирьової антени в 3D для двох положень у просторі

Коефіцієнт підсилення – параметр антени, який показує, у скільки разів щільність потоку енергії, випромінюваної антеною в певному напрямку, перевищує щільність потоку енергії, яку можна було б отримати при використанні ізотропної антени. Цей параметр вимірюється в децибелах (дБі або dB).

Directional antenna signal is more aggregated



3D Orientation chart

Antenna Size

Рисунок 3.2 – Оцінка підсилення антени за моделюванням діаграми спрямованості.

Наприклад, якщо коефіцієнт підсилення антени в певному напрямку дорівнює 5 dBi, це означає, що у цьому напрямку рівень випромінюваної потужності на 5 дБ вищий, ніж у ідеальної ізотропного випромінювача. Підсилення антени, фактично, відображає наскільки сильні спрямовані властивості має антена.

Зазначимо, що збільшення потужності сигналу в одному напрямі спричиняє за собою зменшення потужності в інших напрямках, оскільки антена є пасивним пристроєм і досягати підсилення випромінювання в одному напрямку може лише через зменшення його в іншому. Звичайно, коли говорять, що коефіцієнт

підсилення антени складає  $X$  dBi, то мається на увазі максимальне можливе підсилення антени (за головною пелюсткою діаграми спрямованості) [12].

Коефіцієнт підсилення  $G$  враховує ККД. антени  $\eta_A$  і дорівнює:

$$G = D \cdot \eta_A. \quad (3.1)$$

В діапазоні дециметрових та сантиметрових хвиль ( $f > 1\text{ГГц}$ )  $\eta_A \approx 1$ , отже можна рахувати  $G = D$  [4].

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) – він визначається як відношення максимального значення амплітуди напруженості електричного або магнітного поля стоячої хвилі в лінії передачі до мінімального значення цієї амплітуди. Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) характеризує ступінь узгодження навантаження (наприклад, антени) з лінією передачі (фідером). В однорідній безвтратній лінії це значення залишається сталим уздовж усієї довжини лінії та не залежить від її розміру. Даний показник визначає ефективність роботи всього антенно-фідерного тракту [4].

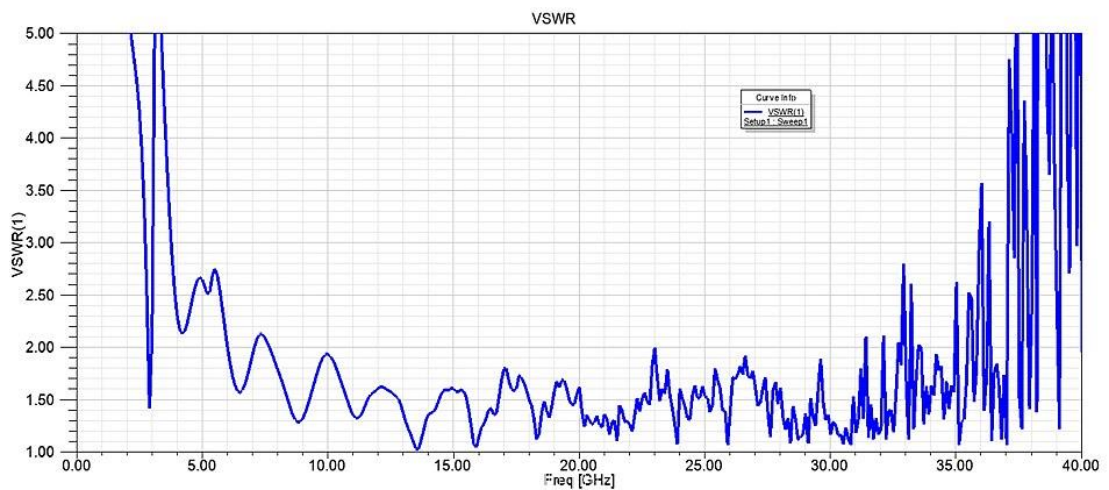


Рисунок 3.3 – Графік залежності КСХ від частоти

Смуга пропускання антени – діапазон частот, у межах якого амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) акустичного, радіотехнічного або оптичного пристрою є досить рівномірною для того, щоб забезпечити передачу сигналу без суттєвого викривлення його форми. Смуга пропускання частіше за все визначається за рівнем КСХ ( $\text{КСХ} = 3$  або  $\text{КСХ} = 2$ ) [4].

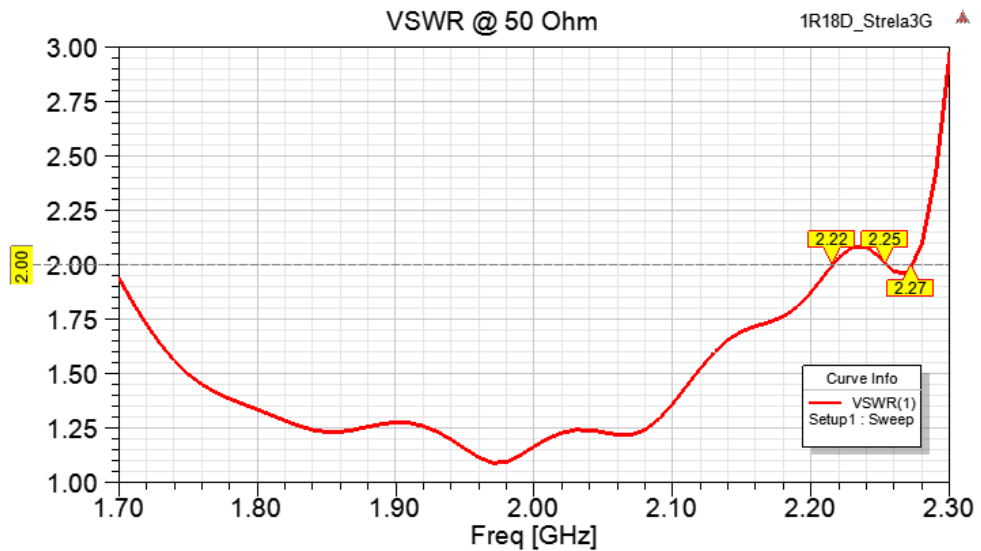


Рисунок 3.4 – Смуга пропускання антени за значенням КСХ=2

Поляризація електромагнітної хвилі – просторово-часова характеристика та визначається видом траєкторії, яку описує кінець вектора електричного поля в фіксованій точці простору.

Поляризація антен буває декількох типів:

- горизонтальна;
- вертикальна;
- кругова або циклічна.

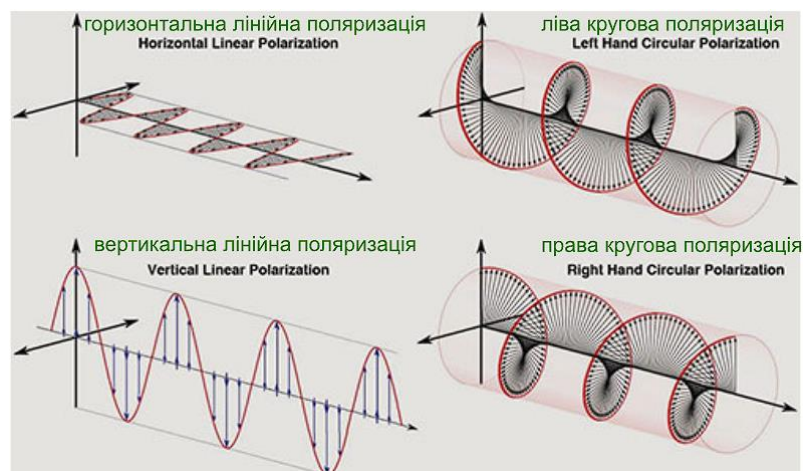


Рисунок 3.5– Графічне зображення типів поляризації ЕМХ

В плоскій електромагнітній хвилі вектори вертикального електричного  $E$  та магнітного  $H$  полів в кожний момент часу орієнтовані у вільному просторі певним фіксованим чином.

При круговій або циклічній поляризації електромагнітне поле обертається навколо осі  $X$  з певним циклом або кроком так, що в різних точках простору приймає або вертикальну, або горизонтальну поляризацію.

Хвильовий опір в точці живлення – це відношення напруги в точці живлення до струму в точці живлення антени. Введення вхідного опору антени ґрунтоване на її розгляді як двополюсника. Вхідний опір антени важливий при визначенні ККД антени і коефіцієнта посилення антени [4].

По теоремі взаємності значення вхідного опору антени в режимах передачі і прийому співпадають. У вхідному опорі  $Z$  антени виділяють опір випромінювання  $R1$  і опір втрат  $R2$ :

$$Z = R1 + R2 \quad (3.2)$$

Опір втрат  $R2$ , у свою чергу, складається з омичних втрат в матеріалах конструкції антени (провідниках і ізоляційних матеріалах) і об'єктах, розташованих у ближній зоні антени (наприклад, в ґрунті, опорах антени). Для підвищення ККД антени необхідно прагнути до узгодження вхідного імпедансу антени з внутрішнім опором джерела (з хвильовим опором лінії передачі), а також до зменшення втрат в антені (тобто зниженню  $R2$ ) [4].

Оцінка узгодження антенно-фідерного тракту виконуються за допомогою показника  $KCX$ .  $KCX$  може бути обчислений за допомогою наступної формули:

$$KCX = \frac{E_f + E_r}{E_f - E_r}$$

де:

$$E_f - \text{енергія прямої хвилі};$$

$$E_r - \text{енергія відбитої хвилі};$$
(3.3)

КСХ може приймати значення від 1 до  $\infty$ . Цей параметр намагаються наблизити до 1, щоб антено-фідерний пристрій працював максимально ефективно, випромінюючи енергію передавача у простір через антену, або передаючи прийняту енергію з ефіру до приймача.

### 3.2 Аналіз ринку антен для управління БПЛА

На ринку зараз присутня велика кількість різноманітних типів антен. Розглянемо базові класифікації антен нижче.

За спрямованістю:

- всеспрямовані (кругової діаграми в горизонтальній площині);
- спрямовані.

За поляризацією:

- лінійна (V, H).
- кругова (RHCP, LHCP).

За діапазоном робочих частот:

- однодіапазонні (працюють тільки в одному бенді);
- мультидіапазонні (працюють в декількох бендах).

За конструкцією:

- панельні (patch);
- багатовібраторні спрямовані;
- параболічні;
- штирьові;
- із складним вібратором всеспрямовані.

Розглянемо більш детально наявні на ринку популярні типи антен, та специфіку їхньої роботи.



Панельні антени (patch антена)— доволі поширений тип антен для діапазонів частот 1-5 ГГц.

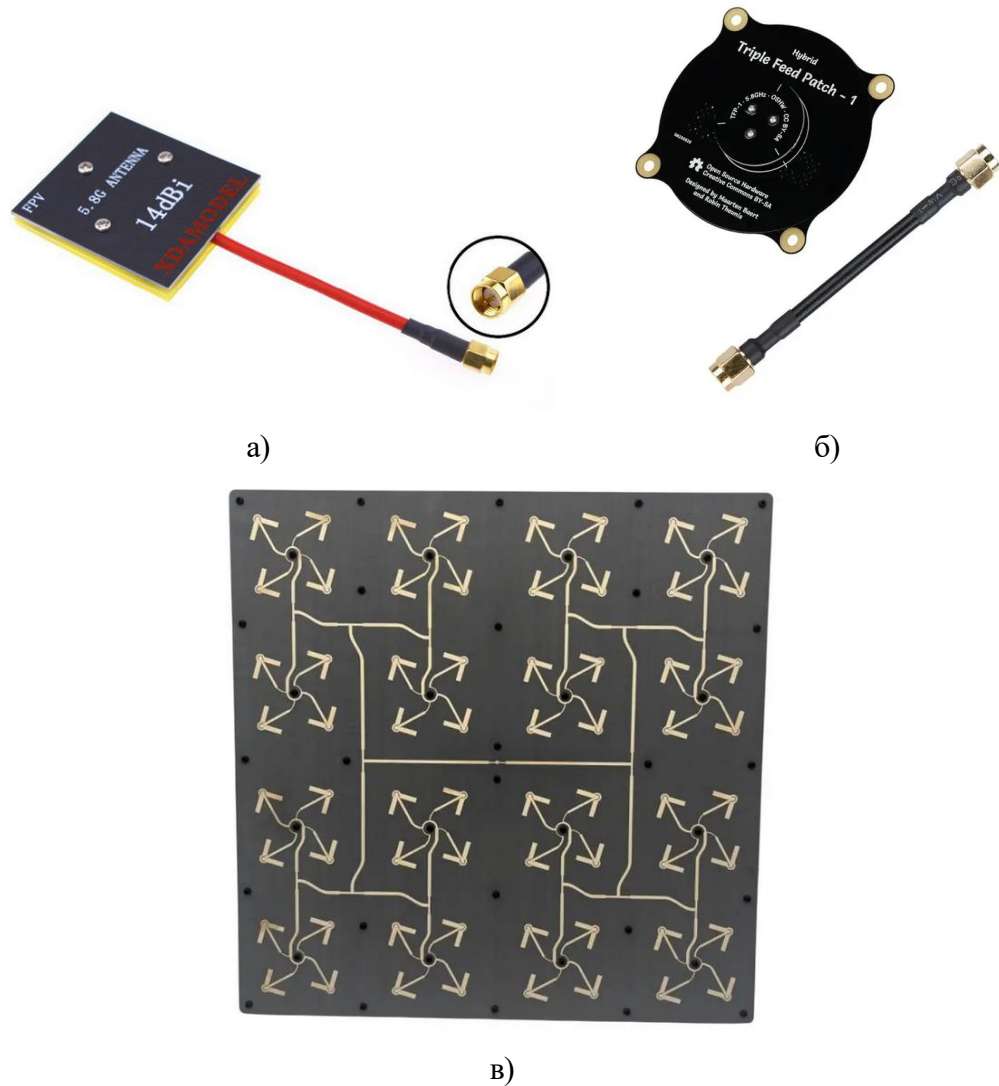


Рисунок 3.6 – Панельні (patch) антени: а) Патч-антена 5.8 ГГц XDAMODEL; б) Патч-антена спрямована 5.8G Hybrid Triple Feed Patch, в) Патч антена Scream Industries 5.8 GHz.

Патч-антени належать до спрямованих антен, проте відрізняються ширшою діаграмою спрямованості, ніж антени типу «хвильовий канал». Завдяки цьому їх легше налаштовувати перед використанням — зазвичай достатньо зорієнтувати антену в напрямку об'єкта зв'язку. Крім того, такі антени мають відносно широкую робочу смугу частот.

Головний елемент такої антени є антенна решітка: із просторовим рознесення дипольних елементів, як правило в горизонтальній площині. Цей спосіб розташування дозволяє досягти покращення якості сигналу у напрямку об'єкта зв'язку. Залежно від поляризації диполі можуть бути розташовані вертикально, горизонтально, із нахилом  $45^\circ$  або особливим геометричним чином для формування кругової поляризації. Для економії місця такі решітки поєднуються в єдиний корпус у вигляді плоскої панелі, звідки і походить власне назва антени [9].

Наступний тип — це класичні багатовібраторні спрямовані антени. Вони характеризуються вузькою діаграмою спрямованості та високим коефіцієнтом підсилення. Водночас такі антени потребують дуже точного позиціонування, інакше їхня ефективність не буде реалізована повною мірою. Зазвичай їх застосовують на значних відстанях між об'єктами зв'язку, а коефіцієнт підсилення може перевищувати 20 dBi [9]. Приклад подібної антени подано на рис. 3.7.



Рисунок 3.7 – Спрямована антена Уда-Ягі

Параболічний тип антен використовується при великій віддаленості від вежі оператора, як правило понад 20 км. Володіють найбільшим підсиленням серед інших типів антен, при цьому головна пелюстка має дуже малий кут розкриву. Процес установки та налаштування досить трудомісткий, і як правило потребує спеціального обладнання [9].



Рисунок 3.8 – Параболічна антена

Штиркові моделі є різновидом кругових всепрямованих антен. Такі антени компактні зручні у користуванні і як правило використовуються у якості штатних антен на багатьох портативних пристроях як то роутери, точки доступу, тощо. Завдяки свої ДС в горизонтальній площині не потребує точного встановлення. Підсилення таких антен зазвичай менше 8 dBi.

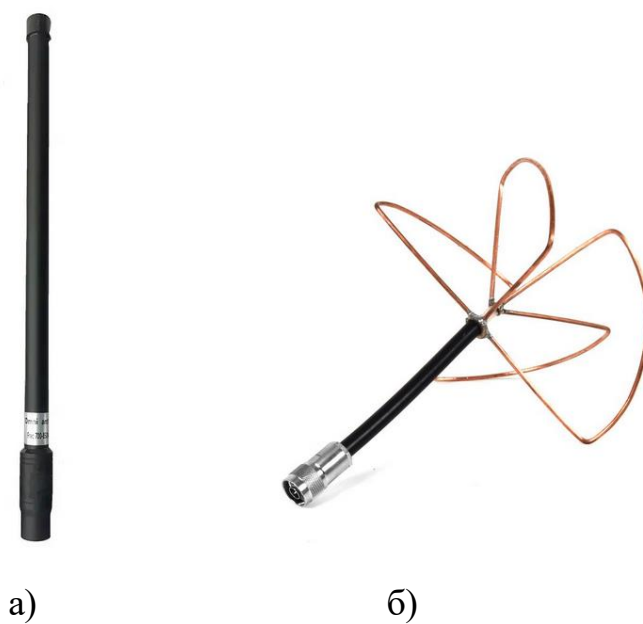


Рисунок 3.9 – Всеспрямовані антени: а) штиркова; б) типу конюшина із круговою поляризацією.

3.3 Рекомендації щодо обрання типу антен в залежності від сценаріїв використання та типу БПЛА

Є два основні типи повітряних БПЛА: літакового типу та роторного типу (рис.3.10).



Рисунок 3.10 – БПЛА: а) літакового типу, б) роторного типу

Основні характеристики цих двох типів БПЛА наведені у табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Основні характеристики типів БПЛА

Характеристика	БПЛА літакового типу	Роторні
Конструкція	Жорстке крило; політ за рахунок підйомної сили	4 (або більше) гвинтів; вертикальна тяга
Тип польоту	Потрібен постійний рух вперед	Можуть зависати в точці
Дальність польоту	Десятки–сотні км	Кілька–десятки км
Тривалість польоту	Від 1 до 10+ год залежно від моделі	20–40 хв, іноді до 1–2 год
Швидкість	Висока (50–150 км/год і більше)	Низька/середня (20–70 км/год)
Маневровість	Обмежена, радіус розвороту більший	Висока, можуть миттєво змінювати позицію
Можливість зависання	Відсутня	Є
Запуск	Катапульта, розгін, запуск з руки	Вертикальний зліт
Посадка	На шасі, «на живіт», у сітку або автоматично	Вертикальна посадка будь-де
Вітростійкість	Висока на швидкості	Середня, залежить від потужності двигунів
Висота польоту	Може літати дуже високо та економно	Менш ефективні на великих висотах
Навантаження	Зазвичай більше корисне навантаження	Обмежений пейслод через споживання енергії
Енергоспоживання	Низьке завдяки аеродинаміці	Високе, двигуни працюють постійно
Сфера застосування	Розвідка дальньої дії, картографія, патрулювання	Скиди, точкові удари, ближня розвідка, FPV
Складність керування	Вища, потребує спеціальних навичок	Нижча, доступна новачкам

З точки зору обрання типу антен в залежності від типу БПЛА пропонується звернути увагу на такий параметр, як маневреність – тобто можливість БПЛА швидко змінювати траєкторію свого руху у різних площинах.

На цей параметр слід звернути увагу з наступних причин: антени як пристрої також мають певну важливість орієнтації у просторі, не тільки з точки зору діаграми спрямованості, а і тому, що у випадку лінійної поляризації втрати сигналу за певних умов взаємного положення (антени приймача і передавача зорієнтовані взаємоперпендикулярно) можуть стати критичними.

Із втратами на переполіризацію електромагнітних хвиль можна ознайомитися в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Втрати сигналу при неспівпадінні поляризації

Поляризація антени	Поляризація поля			
	Вертикальна	Горизонтальна	Правокругова	Лівокругова
Вертикальна	0 дБ	$\infty$	3 дБ	3 дБ
Горизонтальна	$\infty$	0 дБ	3 дБ	3 дБ
Правокругова	3 дБ	3 дБ	0 дБ	$\infty$
Лівокругова	3 дБ	3 дБ	$\infty$	0 дБ

Найбільша маневреність у БПЛА роторного типу, адже він швидко спроможне рухатися в будь-яких площинах в будь-якому напрямі. Тому, лінійна поляризація в цілому не рекомендуються для використання на таких безпілотноках, якщо планується повне використання можливостей його аеродинамічної конструкції щодо можливих напрямів руху. Це здебільшого стосується спортивних перегонів, кінематографу та інших застосувань, де такі фігури польоту є затребуваними.

Тому в цілому для БПЛА роторного типу рекомендоване застосування антен із круговою поляризацією, адже в цьому випадку рухи безпілотнока у просторі не впливають на зміну поляризації, що створює сприятливі умови для більш стабільного сигналу під час зв'язку із БПЛА за умови повного використання можливостей аеродинамічної системи безпілотнока.

Проте при рухах роторних БПЛА без значної зміни горизонтальної або вертикальної орієнтації цілком може застосовуватися лінійна поляризація.

БПЛА літакового типу володіють меншою маневреністю за рахунок особливості аеродинамічної конструкції: вони не можуть зависати на місці, робити оберти на місці. Проте їхня перевага в тому, що за рахунок меншого аеродинамічного спротиву вони можуть розвивати більшу швидкість. Для таких безпілотноків в цілому можна рекомендувати антени як з круговою так і з лінійною поляризацією.

Остання може мати навіть певну перевагу, оскільки завдяки конструктивним особливостям (пласка лінійна геометрія) такі антени можуть бути розміщені в елементах самого БПЛА: фюзеляжі, крилах тощо. І таким чином не будуть погіршуватися аеродинамічні властивості, що дозволяє зберігати переваги літакової схеми БПЛА, що особливо критично на високих швидкостях рис. 3.11.



Рисунок 3.11 – Порівняння варіантів розміщення антен із а) круговою поляризацією типу «конюшина», б) із лінійною поляризацією типу «диполь»

Розглянемо рекомендації щодо застосування розглянутих вище типів антен для різних сценаріїв використання БПЛА:

### 3.3.1. «Сценарій-1» Польоти на великі відстані

Для таких задач скоріш за все будуть використовуватися БПЛА літакового типу через свій значний час автономності польоту.

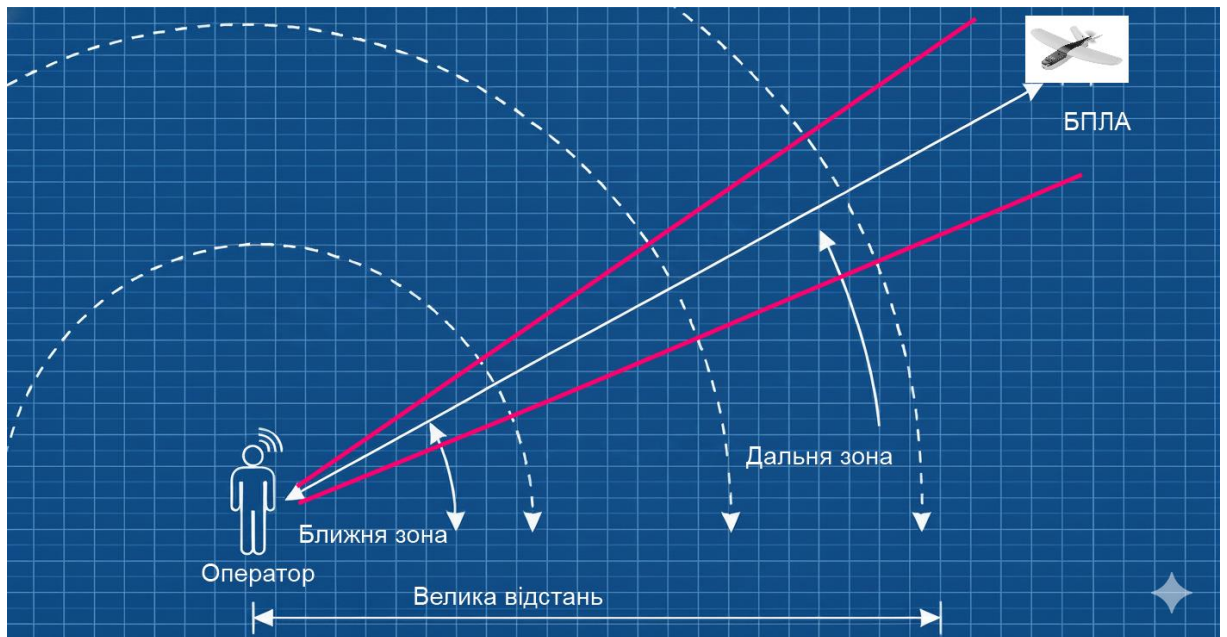


Рисунок 3.12 – Ілюстрація польоту «Сценарій-1»

До типових умов для такого сценарію слід віднести:

- 1) Малі рівні сигналів;
- 2) Повільні завмирання
- 3) Можлива відсутність радіогоризонту.

Відповідно, в цих умовах перевагу слід віддавати спрямованим антенам на щоглах: чим більшою є відстань зв'язку, тим з вищим підсиленням слід антену використовувати і на більшу висоту відносно землі піднімати її.

Можливі варіанти антенного обладнання для таких типів польотів:

1) Спрямовані антени як на боці оператора так і, по можливості, на боці безпілота, якщо є можливість поставити сервопривід для позиціонування спрямованої антени на боці БПЛА, то на ньому може бути використання спрямована антена із більшим підсиленням і відповідно вужчою діаграмою спрямованості.

2) Спрямована антена на боці оператора і вспрямована на боці БПЛА – такий варіант може бути переважним, якщо безпілотно не завжди буде рухатися прямолінійно відносно оператора і немає змоги поставити сервопривід на БПЛА через обмеження ваги або розмірів.



3.3.2 «Сценарій-2» Маневрові польоти навколо оператора на відносно малій відстані.

Для цих задач найбільше підходять як роторні БПЛА (рис.3.13).

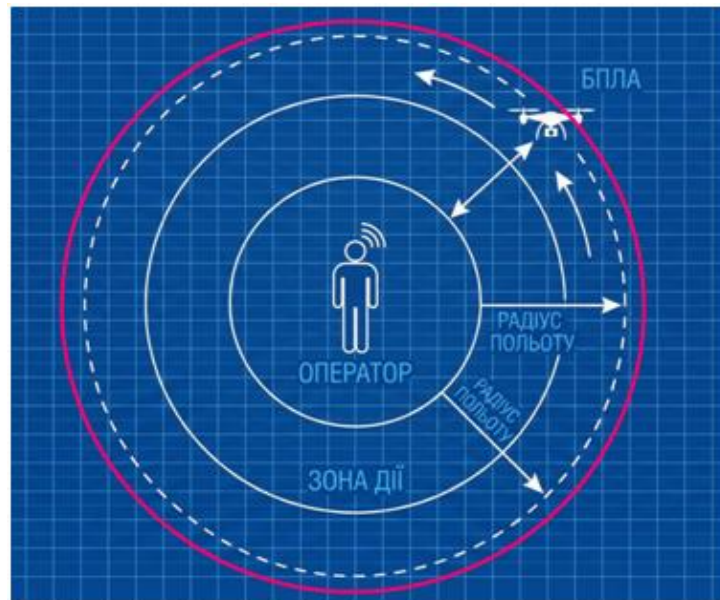


Рисунок – 3.13 – Ілюстрація польоту «Сценарій-2»

До типових умов для такого сценарію слід віднести:

- 1) Високі рівні сигналів;
- 2) Глибокі короткі завмирання
- 3) Наявність сильних інтерференційних явищ.

Можливі варіанти антенного обладнання для таких типів польотів:

- 1) Використання всеспрямованих антен як на боці оператора так і на боці БПЛА, переважно кругової поляризації, яка дозволяє уникати завмирань сигналу через значні зміни положення БПЛА у просторі відносно оператора.

3.3.3 «Сценарій-3» Маневрові польоти на великій відстані.

Через комбінованість характеру польотів можуть використовуватися як роторні так і літакового типу БПЛА.

Складність обрання типу БПЛА полягає в тому, що роторні БПЛА мають низьку економічність і програють у можливостях польоту на великі відстані, в той же час БПЛА літакового типу програють у маневреності, то ж вибір типу БПЛА буде компромісним.

До типових умов для такого сценарію слід віднести:

- 1) Низькі рівні сигналів;
- 2) Комбінації коротких і довгих завмирань.

Дані умови накладають певні специфічні вимоги до антенного обладнання. Це обумовлено тим, що БПЛА може бути орієнтований довільним чином до оператора на значній відстані, що вимагає одночасної роботи як із малими рівнями сигналів при різких можливих змінах поляризації, за умови використання лінійної поляризації. В той же час використання кругової поляризації вимагає використання антен із високим аеродинамічним опором.

Можливі варіанти антенного обладнання для цього сценарію:

- 1) Використання спрямованої антени на боці оператора і всеспрямованої на боці БПЛА: із круговою поляризацією для БПЛА роторного типу, і круговою, або лінійною поляризацією у випадку БПЛА літакового типу.

Зведемо запропоновані рекомендації до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Рекомендації щодо використання типів антен та поляризацій в залежності від сценаріїв використання та типу БПЛА.

Сценарій	1	2	3	
Тип БПЛА	Літаковий	Роторний	Літаковий	Роторний
Тип антени оператора	Спрямована	Всеспрямована	Спрямована	Спрямована
Тип антена БПЛА	Спрямована/ всеспрямована	Всеспрямована	Всеспрямована	Всеспрямована
Поляризація антен	Лінійна	Кругова	Лінійна/Кругова	Лінійна/Кругова

### 3.4 Особливості розташування антенного устаткування на БПЛА

На практиці дуже часто питанню антен і їхньому правильному розташуванню або не приділяється уваги взагалі, або по залишковому принципу. Звичайно, що умови ефективного розташування антен на БПЛА є компромісними та суперечливими.

З одного боку для найбільшої ефективності випромінювання антени вона має бути розташована на певній відстані від елементів корпусу та обладнання БПЛА. Ця відстань формує так звану «ближню зону» антени, в якій дуже важливо, щоб не було сторонніх предметів (рис. 3.14) [10].

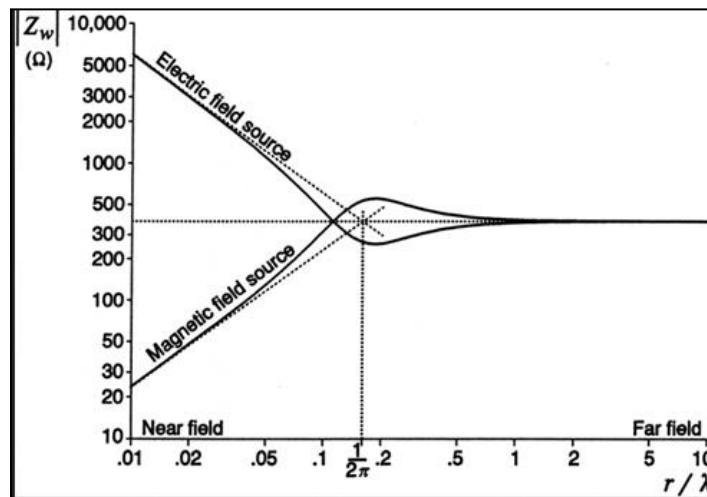


Рисунок 3.14– Графік розподілу ближнього та дальнього полів в залежності від відстані від джерела випромінювання

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (3.4)$$

де  $\lambda = \frac{c}{f}$  - довжина електромагнітної хвилі.

Частоти, які використовуються для зв'язку із БПЛА як правило лежать в межах 800-6000 МГц. Відповідно для цих частот «ближня зона» лежить в межах:

$$\begin{aligned} r_{800\text{МГц}} &= 0.06 \text{ м;} \\ r_{6000\text{МГц}} &= 0.007952 \text{ м.} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Таким чином антени для цих частот мають бути віддалені від корпусу щонайменше від 6 см до 8 мм відповідно. Ще краще буде, коли антена буде винесена ще на більшу відстань.

Важливим є також розташування об'єктів між антеною та оператором БПЛА, тим більше, якщо вони струмопровідні, або мають значну поглинаючу властивість. Це лишає умов «прямої видимості». Особливо це стосується частот 5.8 ГГц.

З іншого боку розміри БПЛА є достатньо компактними, і це породжує складнощі із виносом антени відносно елементів конструкції БПЛА. правило цей фактор є домінуючим, а вже потім враховують електричні вимоги до розташування антен.

На практиці дуже часто питанню антен і їхньому правильному розташуванню або не приділяється уваги взагалі, або по залишковому принципу. Ігнорування вищезазначених рекомендацій призводить до значного падіння ефективності системи зв'язку в цілому.

### 3.5 Проблеми якості комерційного антенного обладнання

Аналіз ринку антен показав, що на даний час, присутня велика кількість різноманітного антенного обладнання. Однак під час розробки та експлуатації БПЛА інженери та користувачі часто стикаються з наступними недоліками антенного обладнання, які будуть наведеними нижче.

1) Багато виробників антен вказують:

- завищений коефіцієнт підсилення (dBi);
- неправдиві діаграми направленості;
- заявляють “універсальність”, яка в ліпшому випадку означає означає компроміси, а в гіршому є простим маркетинговим ходом.
- вузька смуга робочих частот відносно заявлених, що особливо помітно на низьких частотах.

Через наведені недоліки важко оцінити реальні можливості антен. Така політика пояснюється тим, що більшість оцінок параметрів потребує або спеціального обладнання, або навіть складних високовартісних лабораторій із спеціальними режимами вимірювання. Тому більшість споживачів не в змозі оцінити правдивість наведених параметрів антен, що призводить до проблем під час їх експлуатації.

2) Навіть популярні бренди мають наступні проблеми:

- нестабільні параметри від партії до партії;
- погана пайка, низька загальна культура виробництва, що особливо критично для антен НВЧ;
- низька якість матеріалів;
- неточність виготовлення елементів;
- мінімальний контроль якості кінцевої продукції.

У дешевих антен вищезазначені недоліки особливо помітні, адже виробники намагаються максимально зекономити на всьому та максимізувати прибуток.

В результаті навіть правильно спроектовані антени можуть мати незадовільні характеристики, в результаті параметри антен можуть сильно відрізнятись звичайно в гіршу сторону із відповідними наслідками.

## 4 РОЗРОБКА АНТЕННОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВІДЕОКАНАЛУ БПЛА

### 4.1 Аналіз комплектного антенного устаткування системи відеозв'язку MATEKSYS

Враховуючи вищезначені недоліки комерційних антен в рамках кваліфікаційної роботи було вирішено розробити антенну систему, яка може бути застосована в сценарії-1 та сценарії-3. Мова йде про розробку спрямованої та всеспрямованої антени лінійної поляризації. Антени такої поляризації простіші конструктивно і відповідно проявляють доволі хорошу повторюваність.

Що вкладається в поняття «універсальність» щодо розробляємої антенної системи: можливість виготовлення антенної системи в межах частот 800-6000 МГц, таким чином щоб її можна було застосовувати як для каналу управління так і для каналу відеозв'язку.

Пропонується розробити антенну систему для каналу відеозв'язку. В якості обладнання до розгляду було взята система аналогового відеозв'язку MATEKSYS. [11].

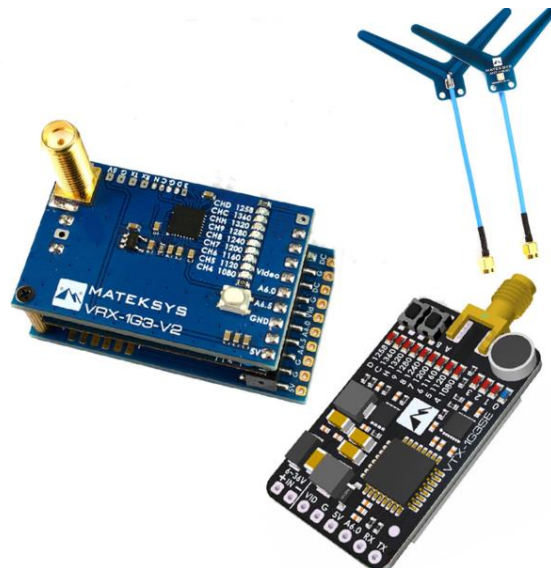


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд системи відеозв'язку MATEKSYS

Основні важливі для роботи ехнічні характеристики до розгляду цієї системи наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні технічні характеристики радіоінтерфейсу відеосистеми MATEKSYS.

Параметр	VTX	VRX
Частотний діапазон, МГц	1080-1360	1080-1360
Хвильовий опір радіочастотного виходу, Ом	50	50
НВЧ роз'єм	SMA female	SMA female
Ширина смуги каналу, МГц	40	40
Потужність/чутливість	800 mW	-95 dBm

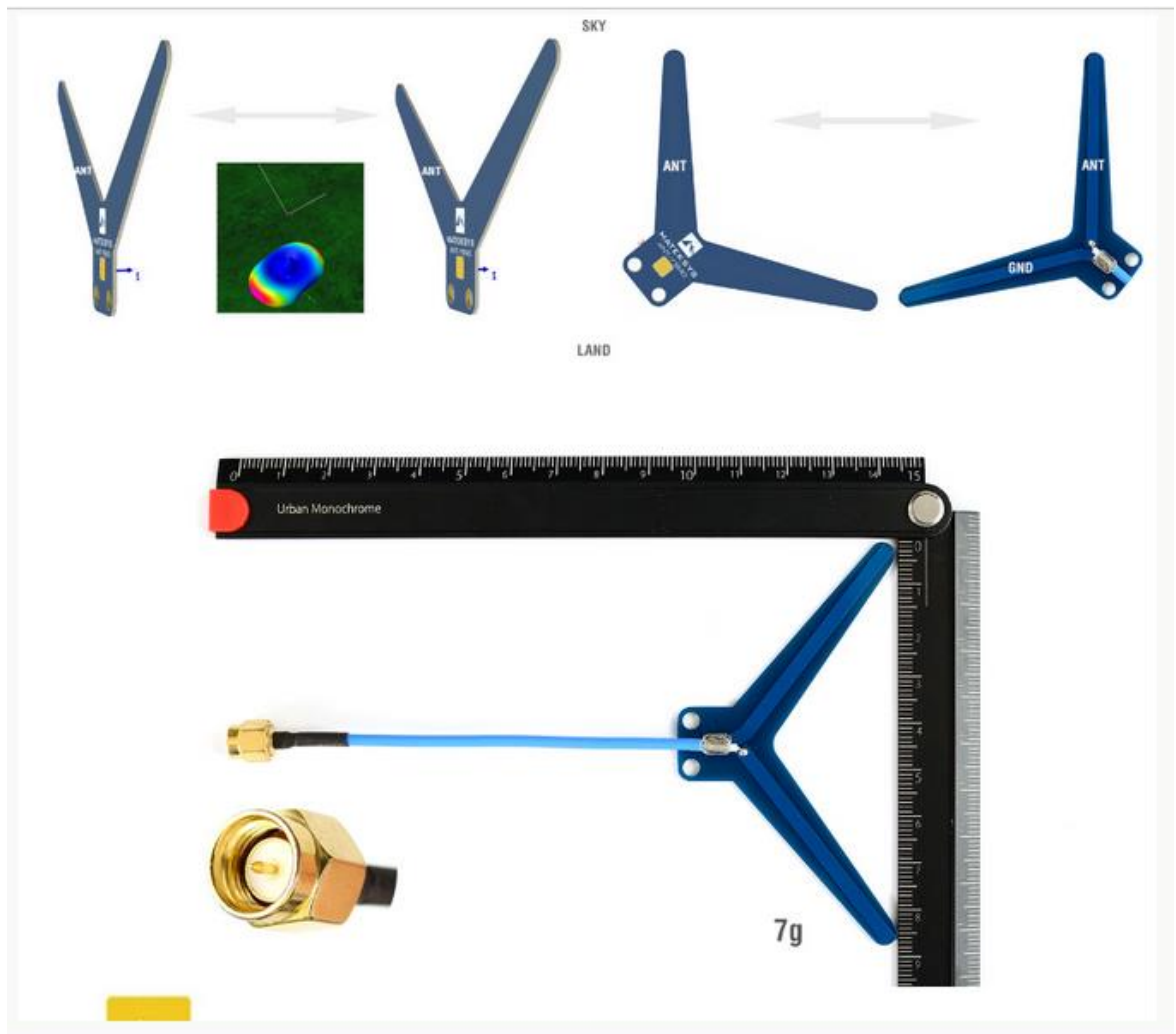


Рисунок 4.2 – Комплектні антени та можливість їх розташування.

Аналіз штатного антенного устаткування показав, що виробник використав у якості антен модифікацію  $\frac{\lambda}{2}$  диполя (рис.4.2).

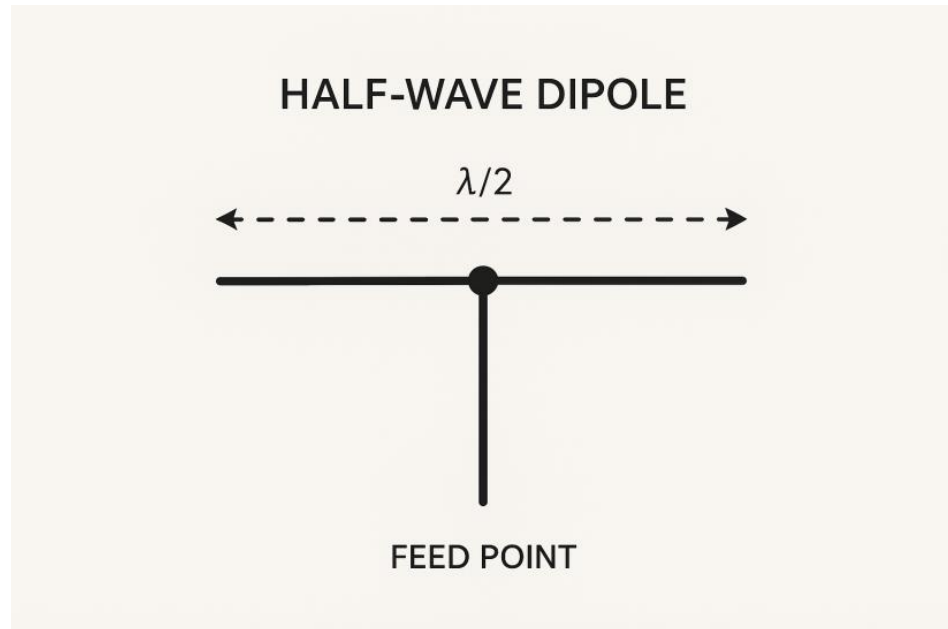


Рисунок 4.3 – Антена  $\frac{\lambda}{2}$

Напівхвильовий диполь складається з двох провідників, кожен довжиною приблизно  $\frac{\lambda}{4}$ , розташованих на одній прямій та живлених у центрі. Загальна довжина антени  $\approx \frac{\lambda}{2}$ . Геометрична довжина приблизно визначається за формулою:

$$l = \frac{141}{f, \text{МГц}} \quad (4.1)$$

Така антена – це один з найпростіших типів антен, із хвильовим опором 75 Ом та підсиленням 2,15 dBi. Для того, щоб узгодити такий тип антени (75 Ом) із

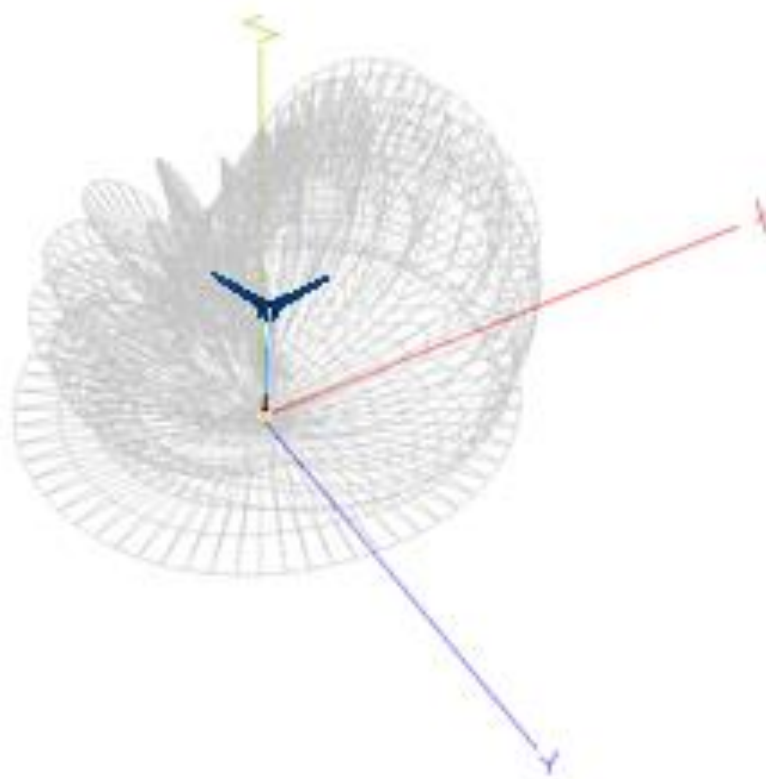


хвильовим опором передавача та приймача (50 Ом), виробник звів половини дipoля під кутом близьким до  $135^\circ$  – сам дipoль стає 50 Ом і добре узгоджується із кабелем.

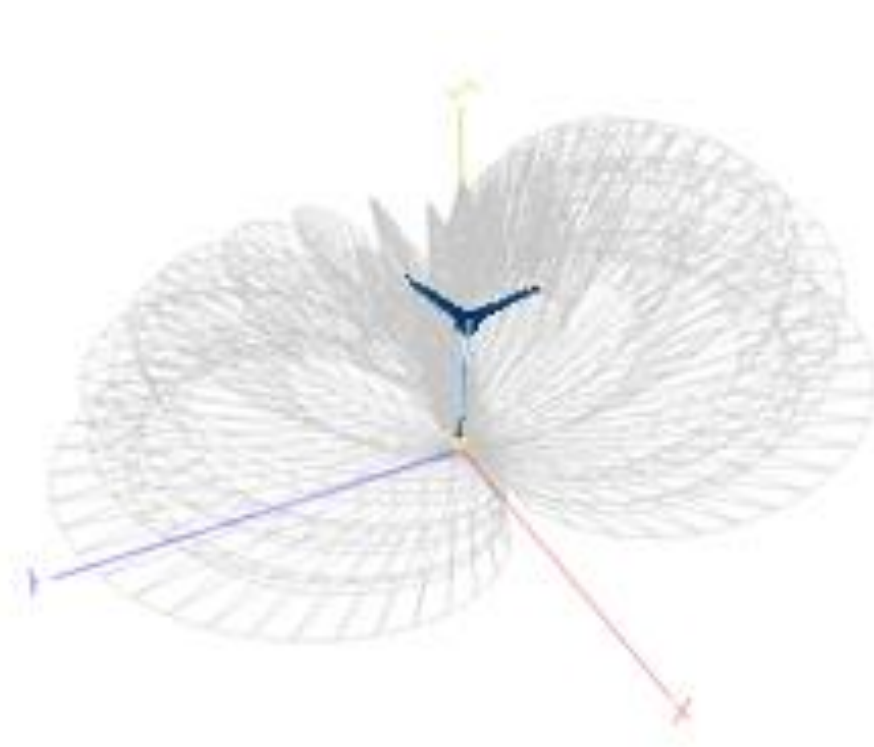
Негативних сторін такого рішення декілька:

- коефіцієнт підсилення знижується і стає меншим 2.15 dBi;
- погіршується діаграма спрямованості – як при розташуванні антени для отриманні як вертикальної поляризації так і горизонтальної.

Результати моделювання діаграми спрямованості такої антени показали наступні результати наведені на рис. 4.4-4.5. Моделювання виконувалося в програмі MMANA-GAL.

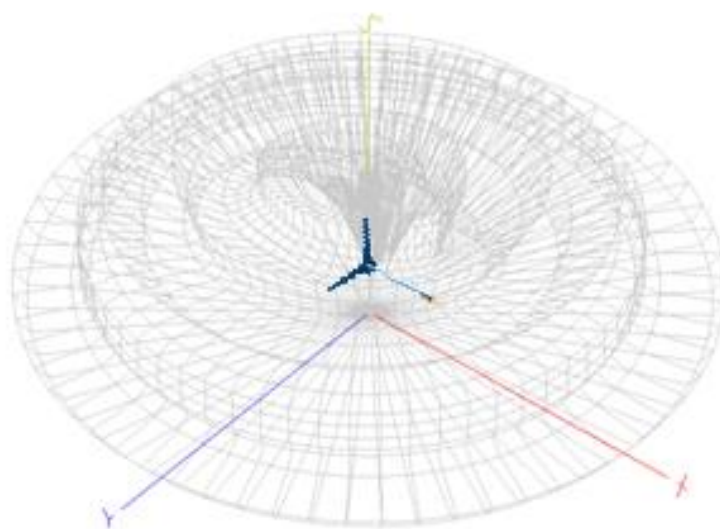


a)

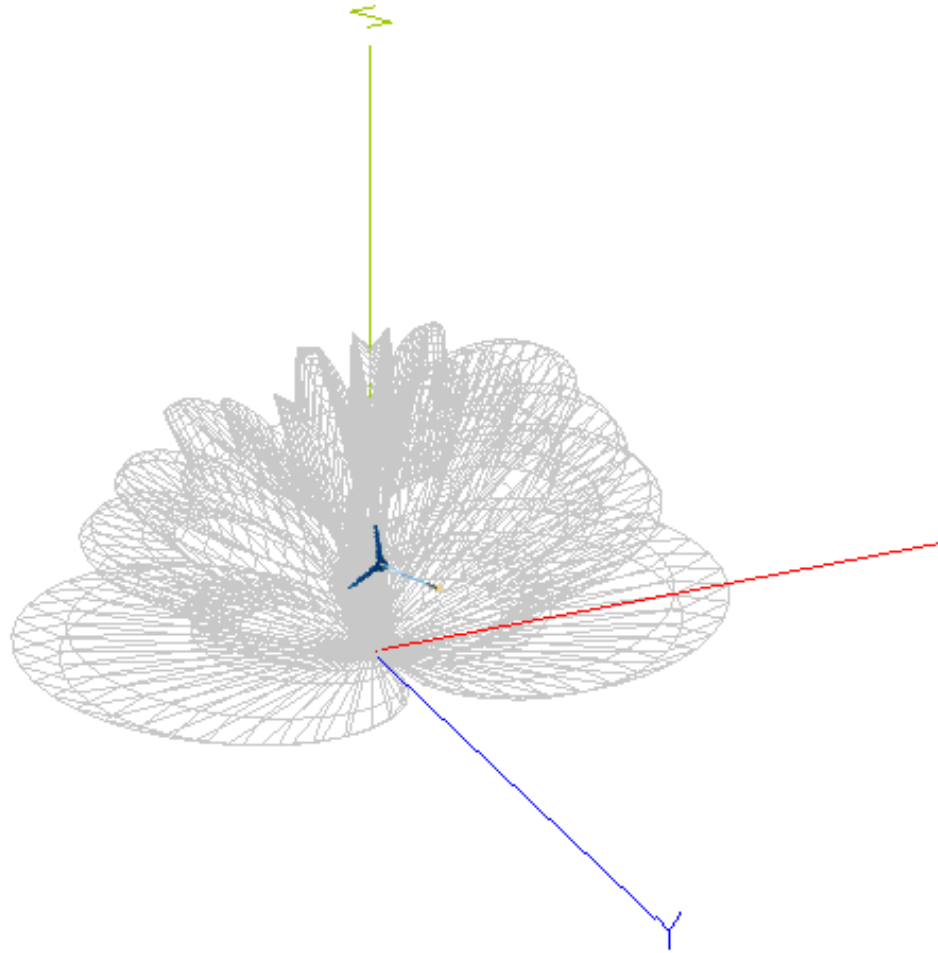


б)

Рисунок 4.4 – Компоненти поляризацій комплектної антени МАТЕКСYS при розташуванні паралельно до землі : а) вертикальна складова; б) горизонтальна складова



а)



б)

Рисунок 4.5 – Компоненти поляризацій комплектної антени MATEKSYS при розташуванні активним елементом перпендикулярно до землі: а) вертикальна складова; б) горизонтальна складова

Аналіз модельних діаграм показує, що у випадку використання такої антени неможливо отримати лише один тип поляризації: вертикальну, або горизонтальну, незалежно від того як розташувати її до поверхні землі, про що свідчать рис. 4.4-4.5. В результаті це погіршує загальну ефективність передачі та прийому радіохвиль під час використання разом із ними однополяризованих антен.

Також було проведене моделювання смуги пропускання цієї антени, яке наведене на рис. 4.6.

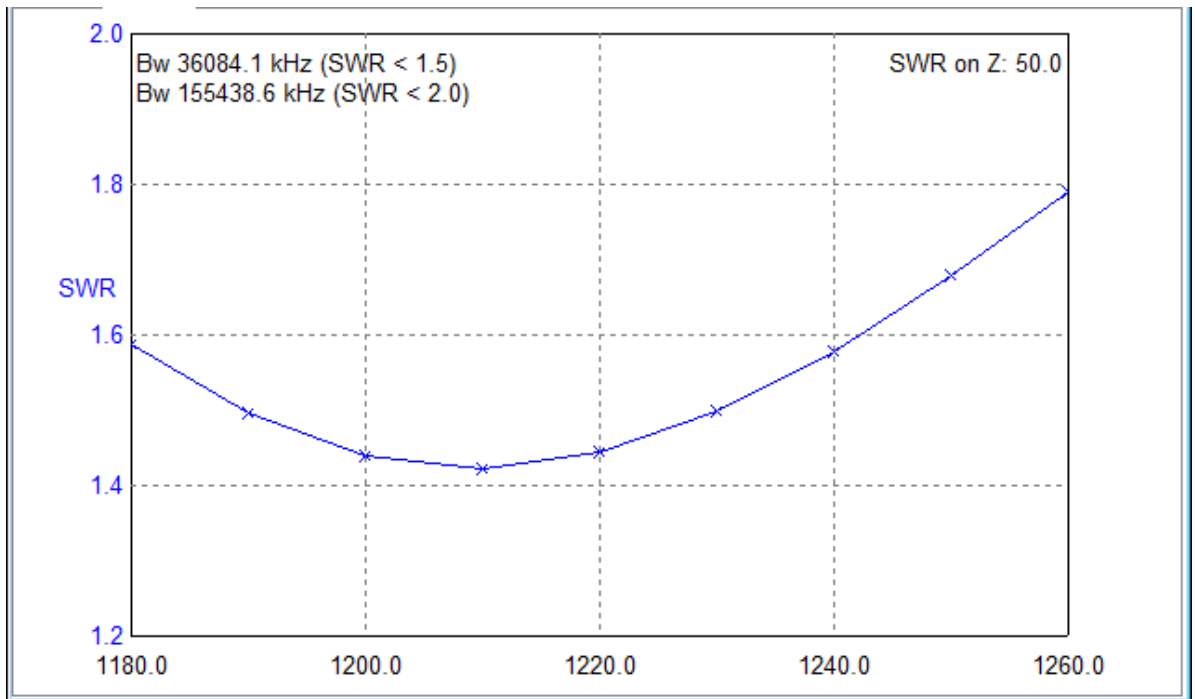


Рисунок 4.6 – Моделювання смуги пропускання комплектної антени  
MATEKSYS 1200

Як видно з рис. 4.6 смуга антени в цілому задовільняє перекриттю частотних каналів відеосистеми MATEKSYS 1200, проте КСХ є відносно високим на центральній частоті, що призведе до певних втрат сигналу на рівні 0.1-0.2 дБ на кожній антені.

В якості резюме, можна сказати, що дане рішення виробника спрямоване на комплектування системи відеозв'язку антенами із мінімізацією витрат на їх виробництво.

Тому в роботі запропоновано розробити та виготовити комплект антен: спрямованої та всеспрямованої.

#### 4.2 Розробка спрямованої антени на частоту 1200 МГц

В основу розробки такої антени була покладена конструкція антени Харченка.

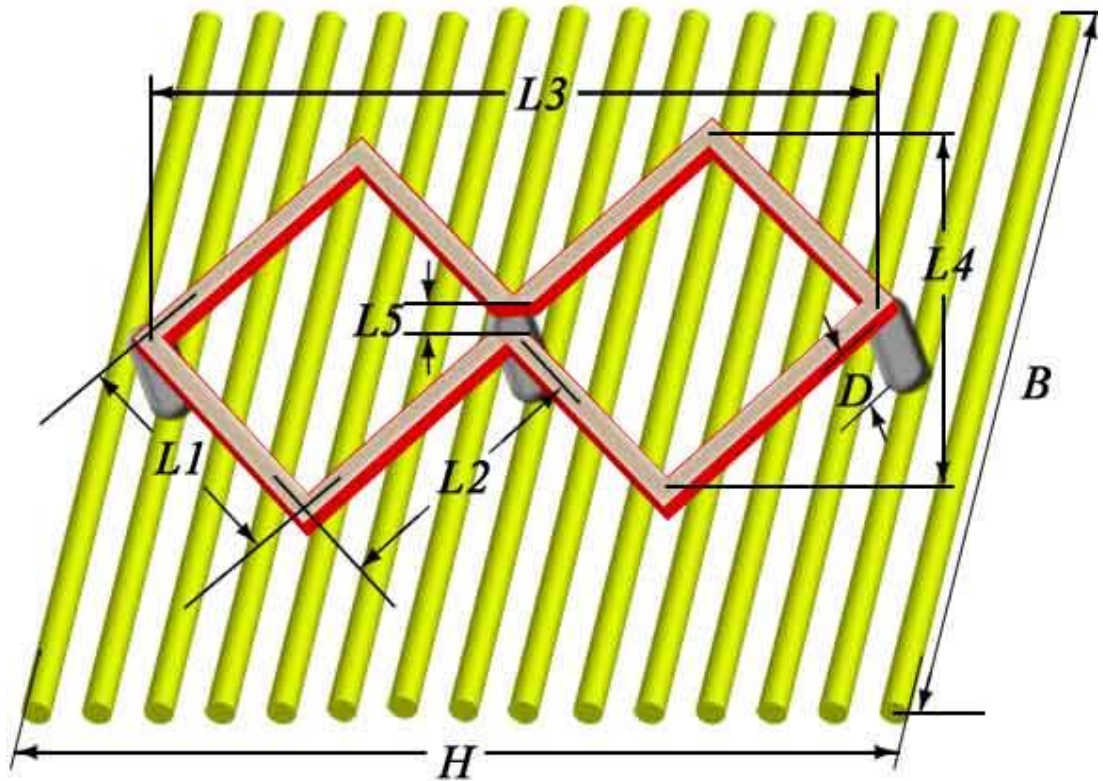


Рисунок 4.7 – Конструкція антени Харченка

Антенa Харченка (або бі-квадрат, biquad antenna) – це популярна спрямована антенa лінійної поляризації, яку легко виготовити власноруч і яка забезпечує високу ефективність у діапазонах від VHF до SHF.

В роботі було вирішено взяти в якості центральної частоти канал на 1220 МГц. Розрахункові параметри отримані за допомогою онлайн калькулятора [12].

За допомогою цього калькулятора можна визначити основні конструктивні розміри антени для її безпосереднього виготовлення по рис. 4.7.

Значення лінійних розмірів елементів прив'язані до діаметру дроту з якого виготовляється активний елемент антени, тому треба звернути увагу на той факт, що під час виготовлення антени із дроту з іншим діаметром, центральна частота, та електричні характеристики антени можуть змінитися і потребувати корегування.

Таблиця 4.2 – Розраховані параметри антени Харченко

Параметр	Значення
Центральна частота, $f$ , МГц	1220
Хвильовий опір антени, $\rho$ , Ом	50
Довжина хвилі, $\lambda$ , мм	246
Розмір L1 (зовнішня сторона квадрата), мм	68.5
Розмір L2 (внутрішня сторона квадрата), мм	59.2
Розмір L3, мм	192
Розмір L4, мм	79.8
Розмір L5 (проміжок в місті підключення), мм	2.2
Відстань вібратор-рефлектор, D, мм	35.8
Розмір B (ширина рефлектора), мм	252
Розмір H (довжина рефлектора), мм	252
Діаметр проволочи вібратора, мм	2.3
Загальна довжина проволочи (с запасом на повороти), мм	511

Слід відзначити, що у якості рефлектора також може бути використана не суцільна струмопровідна поверхня, а наприклад сітка, або решітка. Це може бути актуальним при значному вітровому навантаженні на антену при розміщенні її на щоглу, або на БПЛА, якщо він використовується в якості ретранслятора.

Для того щоб визначити, чи підходить той чи інший рефлектор, треба провести обчислення для максимального можливого розміру отвору (вікна решітки) за умови необхідного коефіцієнта підсилення та коефіцієнту просочування електромагнітної хвилі.

Для даної антени також була змодельована 3D діаграма спрямованості в MMANA-GAL рис. 4.8.

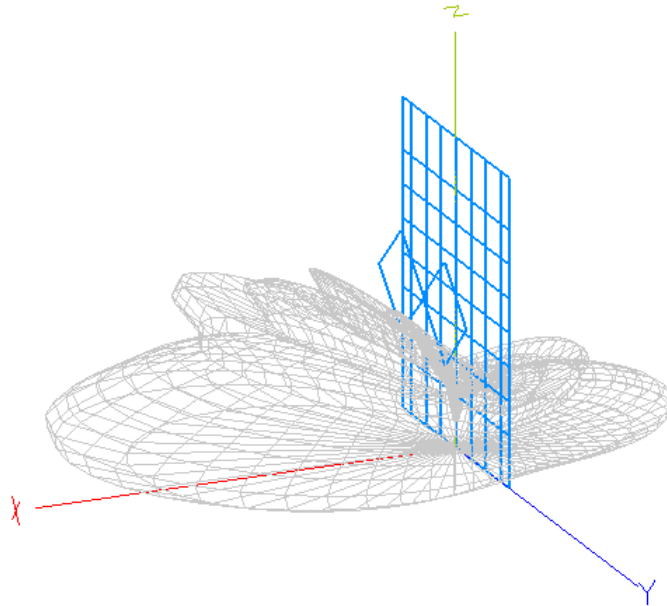


Рисунок 4.8 – 3D діаграма спрямованості антени Харченка

Антенa володіє яскраво вираженою вертикально поляризованою компонентою, що було перевірено моделюванням в програмі, з цього слідує, що антенa може ефективно концентрувати енергію випромінювання в одній вертикальній площині.

Розрахунковий коефіцієнт підсилення склав приблизно 15 dBi. На практиці цей показник буде менше і складатиме 10-12 dBi.

#### 4.3 Розробка всеспрямованої антени на частоту 1200 МГц

Наступною пропонується розробити всеспрямовану антену для БПЛА. в принципі, з бікватратом можна використовувати і комплектну антену, проте, як було з'ясовано, вона має не найліпші характеристики з точки зору діаграми спрямованості.

Отже пропонується розробити просту, ефективну з точки зору випромінювання антену, яка буде володіти прийнятними аеродинамічними

характеристиками, в тому числі і при установці на БПЛА літакового типу, який може розвивати високі швидкості.

В якості основи такої антени пропонується взяти класичну антену Ground Plane (GP).

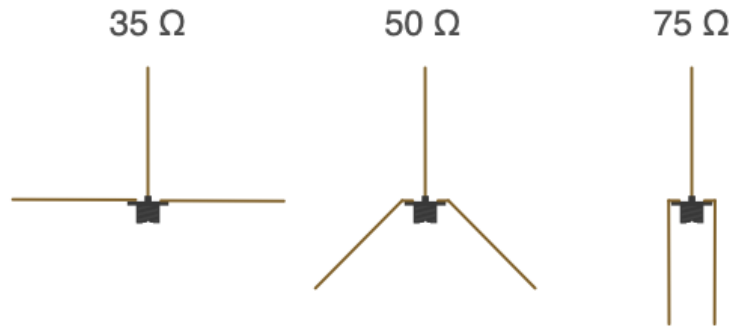


Рисунок 4.9 – Різновиди антени GP із різною кількістю противісів та хвильовим опором

Вона являє собою різновид  $\frac{\lambda}{2}$  диполю, до якого додані додаткові елементи у вигляді противісів, їхня кількість та кут нахилу впливають на хвильовий опір антени. Зазвичай використовують від трьох і більше противівісів, щоб досягти необхідного хвильового опору.

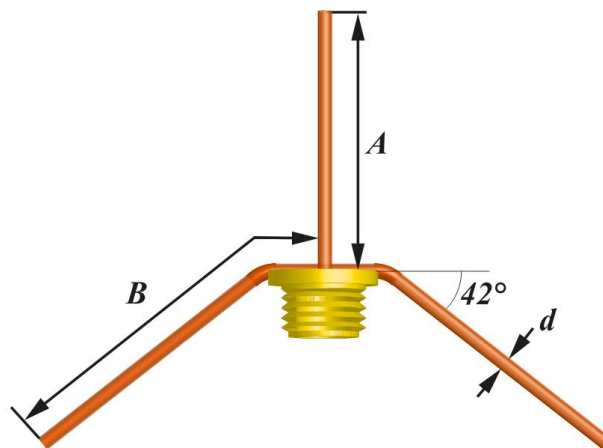


Рисунок 4.10 – Конструкція антени GP із використанням РЧ роз'єму в якості основи



Були обчислені лінійні розміри для частоти 1220 МГц, вони склали: розмір випромінювача  $A=59.3$  мм та противісів  $B=65,3$  мм.

Для даної антени також була змодельована 3D діаграма спрямованості в MMANA-GAL рис. 4.11.

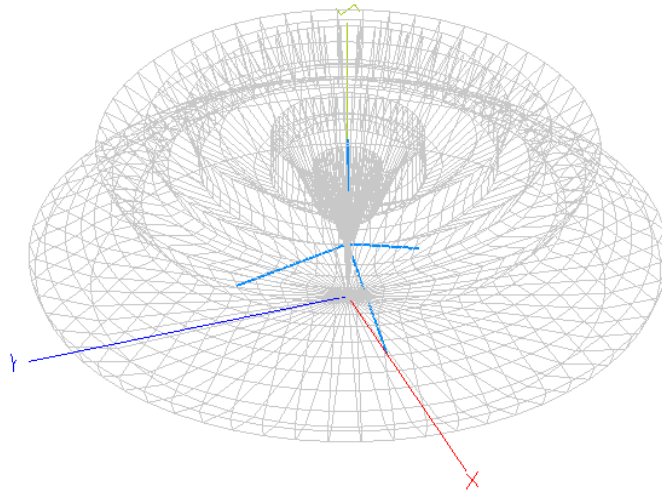


Рисунок 4.11 – 3D діаграма спрямованості для антени GP

Антенa володіє яскраво вираженою вертикально поляризованою компонентою, що було перевірено в програмі, з цього слідує, що антенa може ефективно концентрувати енергію випромінювання в одній вертикальній площині. Розрахункове підсилення антени складає приблизно 5 dBi, на практиці воно буде складати близько 2 dBi як і у  $\frac{\lambda}{2}$  диполю.

#### 4.4 Практичне виготовлення розроблених антен

Оскільки дві розроблені антени мають добрі в тому числі і модельні параметри щодо ефективності формування вертикальної поляризації, було вирішено виготовити ці антени на практиці, з метою оцінки їх узгодження та реальною смуги пропускання.

Для виготовлення антени необхідні наступні матеріали:

- мідний дріт;
- коаксіальний кабель;
- роз'єми;
- матеріал для рефлектора.

Мідний дріт було обрано з перетином 2 мм. Це обумовлюється тим, що з даним перетином дроту зручний працювати і він все ще конструктивно тримає форму, також такий пертин дозволяє реалізувати необхідну смугу частот антени та дає можливість зменшити явище скін-ефекту.

Розглянемо деякі різновиди НВЧ кабелів, вибір був зведений до трьох найбільш розповсюджених, RG-402/U, RG-405/U, RG-58/U. Їхні параметри наведені в табл. 4.3 [13,14,15]..

Таблиця 4.3 – 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 4.4 – 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	-	-	-	-

Марку коаксіального кабелю було обрано RG-402 виходячи з того, що він має невисокі втрати на частоті 1.2 ГГц (табл.4.4) та достатню жорсткість для монтажу антени GP на БПЛА без додаткових елементів кріплення на відміну від інших, розглянутих кабелів.

Для підключення антен до обладнання потрібно використовувати роз'єми – в данному випадку роз'єми SMA. Вони бувають декількох різновидів і зображені на рис. 4.12.



Рисунок 4.12 – Види роз'ємів SMA

Для виготовлення антен потрібні роз'єми SMA MALE.

В якості матеріалу для рефлектора можна застосовувати різні струмопровідні матеріали. Для антени Харченко в роботі був використаний фольгований стеклотекстоліт. Він зручний у механічній обробці, легко доступний і доволі поширений.

Цей матеріал є одним із найдешевших, водночас забезпечує хороші електричні властивості за нормальних умов. Його рекомендовано використовувати в пристроях, що працюють при звичайній вологості повітря, наприклад у побутовій електроніці.

Зовнішній вигляд спрямованої антени наведений на рис. 4.13



Рисунок 4.13 – Зовнішній вигляд виготовленої антени біквадрат.

Після збірки антени, було вирішено перевірити її узгодження із хвильовим опором в 50 Ом, та визначити смугу пропускання, для того щоб зрозуміти, чи задовільняє вона необхідним значенням частотної сітки для відеопередавача і відеоприймача MATEKSYS.



Рисунок 4.14 – Графік залежності КСХ від частоти

Значення КСХ на частоті 1220 МГц складає 1.1, що є дуже добрим результатом, якщо поекспериментувати. А смуга пропускання відносно центральної частоти, по рівню КСХ=2 склала майже 200 МГц, виміри проведені за допомогою векторного аналізатора LiteVNA64.

Таким чином забезпечується робота в усіх каналах системи відеозв'язку MATEKSYS 1200.

Можливість використання спрямованої антени на стороні оператора дає змогу піднімати її на щоглі, що в свою чергу дозволить покращити дальність зв'язку. Але в той же час збільшуватиметься довжина фідеру, в якому відбувається згасання сигналу. Дослідимо цей вплив у наступному підрозділі.

#### 4.5 Оцінка ефективності розробленої антенної систем

Отже проведемо дослідження, як зміниться залежність потенційно досяжної відстані зв'язку для відеоканалу 1220 МГц від висоти підвісу антени для двох випадків:

- використання комплектних антен;
- використання розроблених антен: спрямованої і всеспрямованої.

Дистанції зв'язку для частоти 1220 МГц у випадку відкритої місцевості можуть бути отримані із моделі Окамура- Хата (2.7).

Формула для обчислення можливої відстані зв'язку для відеоканалу 1200 МГц:

$$R_{1200} = 10^{\left( \frac{P_{\text{нд}} - P_{\text{прм}} - 69.55 - 26.16 * \lg(f) + 13.82 * \lg(h_{\text{BTS}}) + \alpha(h_{\text{MS}}) + 4.78 * (\lg(f))^2 - 18.33 * \lg(f) + 40.94}{k(44.9 - 6.55 \lg(h_{\text{BTS}}))} \right)} \quad (4.2)$$

Результати обчислень наведені в табл. 4.5. Вхідні параметри систем зв'язку залишаються такими самими в обох випадках і взяті із табл. 2.2, для обох випадків обчислень, за єдиною відмінністю у підсиленні антен: комплектних і розроблених. При цьому висота польоту БПЛА  $h_{\text{BTS}} = 150$  м. Результати обчислень зведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Потенційно досяжні відстані зв'язку для відеоканалу із використанням комплектних та розроблених антен.

Висота підвісу антени оператора, м	Відстань зв'язку, км		
	Комплектні антени	Розроблені антени	Відносний виграш
0.5	18.19	19.109	1.0505
1	20.629	21.671	1.0505
2	24.109	25.327	1.0505
3	26.621	27.966	1.0505
4	28.564	30.006	1.0504
5	30.111	31.632	1.0505
6	31.361	32.945	1.0505
7	32.375	34.01	1.0505
8	33.195	34.872	1.0505
9	33.853	35.563	1.0505
10	34.372	36.108	1.0505

В таблиці містяться розрахункові дані досяжної потенційної відстані зв'язку для відеоканалу у двох випадках: із використанням комплектних антен і розроблених антен. Також розрахунок відносного виграшу у дистанції зв'язку між цьома двома варіантами обладнання зведений в останній правий стовпець.

Графічне зображення табличних даних наведено на рис. 4.15.

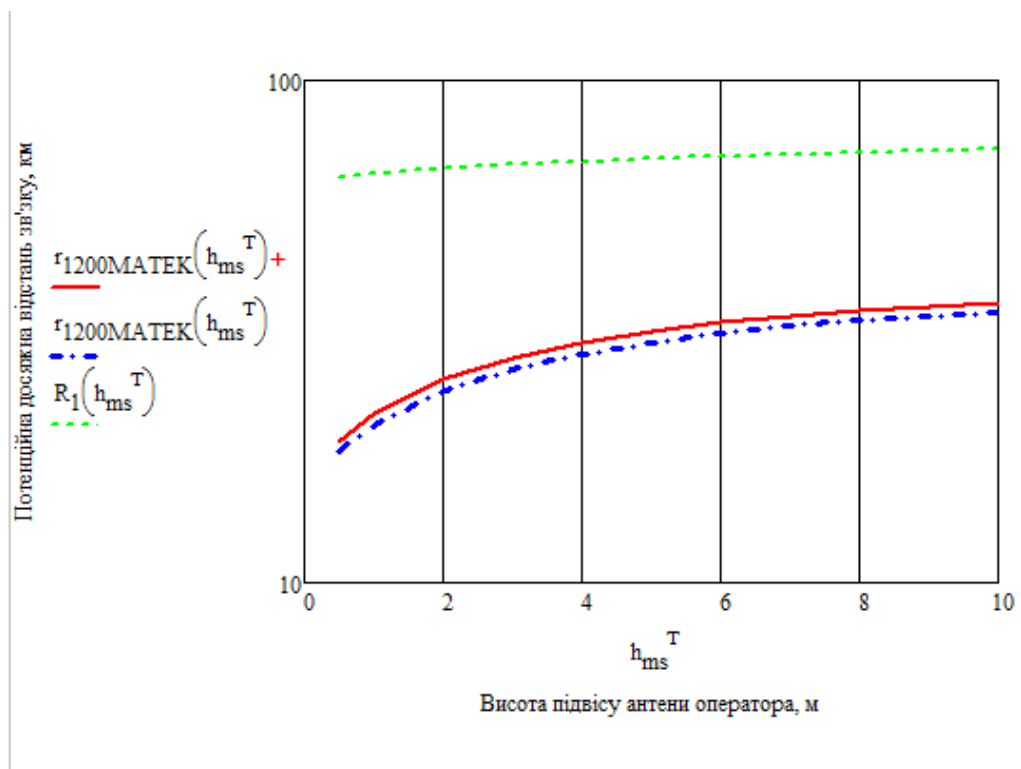


Рисунок 4.15 – Потенційно досяжні відстані зв'язку для відеоканалу із частотою 1220 МГц із використанням комплектних антен (синій пунктир із точкою) і з використанням розробленого комплекту антен (червона суцільна лінія)

Таким чином, проведені дослідження показують перевагу у використанні розроблених антен відносно комплектних в середньому у 5% на всіх висотах підвісу антен. Практичні результати можуть бути ще кращими, оскільки спрямована антена за певних обставин, за рахунок придушення задніх пелюсток може покращувати не тільки рівень корисного сигналу, але і відношення «сигнал-шум».

## ВИСНОВКИ

В роботі проведений детальний аналіз антенного устаткування для управління БПЛА.

Розглянуті технічні аспекти бездротових каналів зв'язку, що використовуються для управління БПЛА, виділені їх особливості та описані моделі розповсюдження радіохвиль.

В роботі наведені рекомендації щодо застосування різних типів антен в залежності від типу БПЛА та для різних сценаріїв їхнього використання.

Проведений аналіз ринку антен показав наявність великої кількості різноманітного антенного обладнання. Однак під час розробки та експлуатації БПЛА інженери та користувачі часто стикаються з недоліками більшості наявного комерційного антенного обладнання, які в свою чергу негативно впливають на кінцеву якість управління БПЛА.

Враховуючи вищезначені фактори, в рамках кваліфікаційної роботи було вирішено розробити антенну систему, яка може бути застосована в сценарії-1 та сценарії-3.

Як результат, в роботі виконана розробка спрямованої та всеспрямованої антени лінійної поляризації для частоти 1220 МГц, для можливості використання із обладнанням відеозв'язку від MATEKSYS, оскільки комплектні антени мають компромісні поляризаційні характеристики.

В якості спрямованої антени була взята антена біквадрат, котра має відносно просту конструкцію і володіє відносно високим коефіцієнтом підсилення в 10 dBi, а в якості всеспрямованої – антена ground plane, із коефіцієнтом підсилення близько 2 dBi. Обидві антени в результаті моделювання показали гарні поляризаційні характеристики, що в цілому має позитивно вплинути на якість зв'язку.

Антени були розраховані на центральну частоту 1220 МГц, та виготовлені практично. Наведені обґрунтування і рекомендації щодо обрання матеріалів для



побудови антен, зокрема кабелю і матеріалів активних елементів антен та рефлектору.

Отримані характеристики узгодження в цілому збігаються із розрахунковими, і є навіть кращими по узгодженню. Виміри проводилися за допомогою векторного аналізатору LiteVNA64. Отримана смуга пропускання для спрямованої антени відносно центральної частоти, по рівню  $K_{CX}=2$  склала майже 200 МГц. Що цілком задовільняє роботі в усій частотній сітці розглянутого обладнання. Можливість використання спрямованої антени на стороні оператора дає можливість піднімати її на щоглі, що в свою чергу дозволить покращити дальність зв'язку.

Виконані розрахунки потенційно досяжної відстані зв'язку для відеоканалу із використанням комплектних та розроблених антен в середовищі MathCad. Обчислення показують перевагу розроблених антен у використанні над комплектними антенами в середньому на 5% на всіх висотах підвісу антен.

Запропоновані антени можуть бути обчислені для використання у широкому діапазоні частот, в яких можуть керуватися БПЛА. При цьому якісні характеристики, зокрема щодо узгодження можуть бути набагато кращими ніж у більшості комерційних зразків.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Відеоприймач Matek VRX-1G3-V2 1.2-1.3GHz, 2025. [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, 2025. [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?, 2025. [Електронний документ] -Режим доступу: <https://modelistam.com.ua/chto-vybrati-crossfire-elrs-a-291/>
4. Ємельянов В.В. Конспект лекцій з дисципліни «Системи мобільного зв'язку»: конспект лекцій/В.В. Ємельянов [Електронний документ] – 48 с.
5. 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.
6. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd edition. New Jer-sey: Prentice Hall, 2001. 707 p.
7. 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],
8. 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.
9. Карл Ротхаммель - Антенны. Том 1, 2 (Издание 11-е), 2025. [Електронний документ] -Режим доступу: <https://radiohata.com/transfer/9079-karl-rothammel-antenny-tom-1-2-izdanie-11-e.html>
10. Near-Field / Far-Field Transition Distance, 2025. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.rfcafe.com/references/electrical/near-far-field.htm>

11. Приймач і передавач МАТЕК VTX-1G3SE-9 1.2Ghz 1.3GHz, 2025. [Електронний ресурс] -Режим доступу: <https://greenchip.com.ua/191-0-1697-0.html>
12. Антенна Харченко 2025. [Електронний ресурс] -Режим доступу <https://3g-aerial.biz/konstruktsii-antenn/odnonapravlennye-antenny/antenna-kharchenko-dlya-3g-i-wifi>
13. RG-405, 2025. [Електронний документ]-  
Режимдоступу: <http://radiolab.com.ua/index.php/component/content/article?id=72>
14. RG-402, 2025. [Електронний документ]-  
Режимдоступу: <http://www.radiolab.com.ua/index.php/component/content/article?id=71>
15. RG-58U, 2025. [Електронний документ]-Режимдоступу: <https://3g-group.com.ua/ua/p427468187-kabel-koaksialnyj-58u.html>