

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка та синтез підсилювача відеосигналу для обробки
зображень з БПЛА
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання
групи ЕПМ-23-1

Мирошніченко С. С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Електронні прилади та пристрої
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Грицунов О. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Ігор Бондаренко
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристороїв
(повна назва)Рівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)Освітня програма Електронні прилади та пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Мирошніченку Сергію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)1. Тема роботи Розробка та синтез підсилювача відеосигналу для обробки зображень з БПЛАзатверджена наказом університету від 06 12 2024 р. № 1283Ст2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 31 12 2024 р.3. Вихідні дані до роботи. Розрахувати підсилювач відеосигналу для з основним призначенням: обробка зображень з БПЛА військового призначення з такими параметрами:

- коефіцієнт підсилення за напругою $K_0 = 110$;
- тривалість імпульсу $t = 0.02$ мкс;
- відносний скол вершини імпульсу $< 0.3\%$;
- відносна тривалість фронту < 0.1 ;
- опір навантаження підсилювача $R_H = 0.2$ кОм;
- ємність навантаження підсилювача $C_H = 10$ пФ.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У БПЛА2 СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ТА ПРИЙОМУ ВІДЕОСИГНАЛУ З БПЛА3 СТАНДАРТНІ ПРОТОКОЛИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З БОРТУ БПЛА4 РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА ВІДЕОСИГНАЛУ

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Відомість кваліфікаційної роботи магістра

Схема електрична принципова

Слайди презентації

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	28.11.2024	
2	Огляд інформаційних джерел	28.11–05.12	
3	Створення проекту	06.12–11.12	
4	Розробка конструкції пристрою	12.12–15.12	
5	Пояснювальна записка	16.12–24.12	
6	Підготовка презентації	25.12–26.12	
7	Рецензування, нормоконтроль	27.12–30.12	
8	Здача роботи на кафедрі	31.12.2024	

Дата видачі завдання 28 11 2024 р.

Здобувач _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

проф. Грицунов О.В. _____

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 70 сторінок, 20 рисунків, 6 таблиці, 9 джерел, 3 додатки.

БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ПІДСИЛЮВАЧ
ВІДЕОСИГНАЛУ, АЛГОРИТМИ ВІЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ,
ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ, YOLO,
SSD, FASTER R-CNN.

Об'єкт дослідження – системи передачі відеосигналу з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на наземні комплекси керування.

Мета роботи – удосконалення методів обробки та передачі відеосигналу для забезпечення високої якості зображень і мінімізації затримок у системах керування БПЛА.

Метод дослідження – чисельне моделювання роботи підсилювача відеосигналу з використанням сучасних алгоритмів і технічних рішень.

У роботі досліджено алгоритми виявлення об'єктів на зображеннях, такі як YOLO, SSD, Faster R-CNN; методи оптимізації передачі відеосигналу, включно з багатоканальними системами зв'язку та супутниковими технологіями; розподіл електромагнітних полів у системах зв'язку БПЛА.

Результати досліджень дозволяють розробити підсилювач відеосигналу, що покращує надійність передачі та знижує вплив зовнішніх перешкод.

Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення систем передачі даних БПЛА у військовій, аграрній, екологічній та інших галузях.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 70 pages, 20 figures, 6 tables, 9 references, 3 appendixes.

UNMANNED AERIAL VEHICLE, VIDEO SIGNAL AMPLIFIER, OBJECT DETECTION ALGORITHMS, ELECTROMAGNETIC FIELDS, SIGNAL TRANSMISSION OPTIMIZATION, YOLO, SSD, FASTER R-CNN.

Research Object – Video signal transmission systems from unmanned aerial vehicles (UAVs) to ground control stations. Objective – To improve methods of processing and transmitting video signals to ensure high-quality images and minimize delays in UAV control systems. Research Method – Numerical modeling of video signal amplifier operation using modern algorithms and technical solutions. The study examines object detection algorithms such as YOLO, SSD, Faster R-CNN; methods of optimizing video signal transmission, including multichannel communication systems and satellite technologies; distribution of electromagnetic fields in UAV communication systems. Research results enable the development of a video signal amplifier that improves transmission reliability and reduces the impact of external interference.

The results of the work can be used to enhance data transmission systems of UAVs in military, agricultural, environmental, and other fields.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ -----	4
ABSTRACT-----	5
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, -----	8
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ -----	8
ВСТУП -----	9
1 МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У БПЛА	11
1.1 Аналіз радіокомунікаційних каналів для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) -----	11
1.2 Взаємне розташування БПЛА та наземного комплексу управління ----	13
1.3 Виявлення об'єктів за допомогою датчиків БПЛА -----	16
1.4 Проблеми виявлення об'єктів БПЛА -----	18
1.5 Метод виявлення об'єктів БПЛА на основі глибокого навчання -----	19
1.6 Класифікація БПЛА за конструкцією -----	21
2 СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ТА ПРИЙОМУ ВІДЕОСИГНАЛУ З БПЛА -----	26
2.1 Види систем прийому та передачі відеосигналу -----	26
2.2 Модуль відеопередавача БпЛА -----	28
2.3 Приклади систем передачі даних -----	30
3 СТАНДАРТНІ ПРОТОКОЛИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З БОРТУ БПЛА -----	36
3.1 Вимоги до систем передачі даних з БпЛА-----	36
3.2 Вимоги до форматів відеозображень і до їх каналів передачі -----	37
3.3 Стандарти передачі даних -----	43
4 РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА ВІДЕОСИГНАЛУ -----	50
4.1 Розрахунок смуги пропускання-----	50
4.2 Розрахунок кількості каскадів -----	51
4.3 Розрахунок кінцевого підсилювального каскаду-----	53
4.4 Розрахунок Y-параметрів -----	55
4.5 Розрахунок високочастотної емітерної корекції -----	58
4.6 Стабілізація режиму роботи підсилюючого каскаду -----	60
4.7 Розрахунок передконечних каскадів-----	63
4.8 Низькочастотна корекція RC-колом -----	65
ВИСНОВКИ-----	68

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	70
ДОДАТОК А	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК В	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АФП – антен-фідерний пристрій;
- БПЛА – безпілотний літальний апарат;
- ГПР – ґрунтопроникаючий радар;
- КНД – коефіцієнт направленої дії;
- НВЧ – надвисокі частоти;
- НКК – наземний комплекс керування;
- НСУ – наземна станція управління;
- ROI – область інтересу (Region of Interest);
- RPN – мережа пропозицій регіонів (Region Proposal Network);
- R-CNN – алгоритм для виявлення об'єктів (Region-based Convolutional Neural Network);
- SPP – просторовий пірамідальний пулінг (Spatial Pyramid Pooling);
- SSD – детектор однієї зйомки (Single Shot MultiBox Detector);
- YOLO – алгоритм виявлення об'єктів (You Only Look Once);
- УКХ – ультракороткі хвилі.

ВСТУП

З розвитком технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та радіоелектроніки, актуальними стають питання удосконалення каналів зв'язку між БПЛА та наземними комплексами керування (НКК). Ці технологічні досягнення відкривають нові можливості для автоматизації та ефективного управління польотами. Сучасні досягнення дозволяють здійснювати автоматичне керування польотом за допомогою автопілотів навіть за відсутності постійного зв'язку з НКК, що значно розширює функціональні можливості БПЛА.

Втім, для забезпечення повноцінної та надійної експлуатації БПЛА необхідно забезпечити постійний контроль за їх станом та можливість корекції польотних параметрів у реальному часі. Це включає моніторинг критичних систем апарату, а також аналіз і обробку отриманих даних для прийняття оперативних рішень. Одним з найважливіших аспектів у цьому процесі є передача даних корисного навантаження БПЛА на НКК з мінімальними затримками та високою якістю, що дозволяє оперативно реагувати на змінні умови та підтримувати високий рівень безпеки і ефективності польотів.

Для забезпечення цих вимог виникає необхідність у розробці та синтезі підсилювачів відеосигналу, що можуть ефективно обробляти та передавати візуальні дані з БПЛА на наземний комплекс. Підсилювачі відеосигналу повинні забезпечувати високу якість передаваних зображень, мінімізуючи втрати інформації та затримки. Такі підсилювачі мають відповідати сучасним вимогам щодо пропускної здатності каналу, ймовірності бітових помилок та інших параметрів, що визначають надійність і якість передачі даних.

Ця дипломна робота присвячена розробці та синтезу підсилювача відеосигналу для обробки зображень з БПЛА. У роботі розглянуто основні принципи розробки підсилювачів, а також проведено аналіз сучасних технологій та підходів, що дозволяють оптимізувати роботу підсилювачів відеосигналу в умовах експлуатації БПЛА. Основною метою роботи є створення

високоєфективного підсилювача відеосигналу, що забезпечить якісну та надійну передачу візуальних даних з мінімальними затримками і втратами інформації. Реалізація цієї мети сприятиме подальшому розвитку технологій БПЛА та їх інтеграції в різні сфери діяльності, де необхідне високоякісне візуальне спостереження та аналіз даних.

1 МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У БПЛА

1.1 Аналіз радіокомунікаційних каналів для безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

З розвитком безпілотних літальних апаратів (БПЛА) виникає потреба у забезпеченні надійного зв'язку між БПЛА та наземними станціями управління (НСУ). Одним із ключових елементів цієї системи є вибір частотних діапазонів для радіокомунікацій. Цей вибір має враховувати масу, розміри, енергоспоживання комунікаційного обладнання та відповідність державним регуляціям. Вибір частотного діапазону не лише впливає на якість та надійність зв'язку, але й на загальні характеристики і функціональність системи зв'язку.

Для забезпечення надійної роботи радіокомунікаційних систем для малих БПЛА вагою до 5 кг необхідно враховувати масу, розміри та енергоспоживання комунікаційного обладнання. Для частотного діапазону 2,4 ГГц, ширина смуги пропускання не повинна перевищувати 15 МГц на рівні -3 дБ та 22 МГц для спектрального шуму[1].

Основними факторами, які слід враховувати при виборі частотного діапазону, є:

а) інтерференція: У густонаселених міських районах частотний діапазон 2,4 ГГц може бути перевантажений через велику кількість бездротових пристроїв, що використовують цей діапазон. Тому доцільно розглянути можливість використання альтернативних частотних діапазонів, наприклад, 5,8 ГГц;

б) пропускна здатність: Чим ширша смуга пропускання, тим більше даних можна передавати за одиницю часу, що є важливим для передачі відеосигналу з високою роздільною здатністю;

в) маса та розміри обладнання: Легше обладнання з меншими розмірами є бажаним для малих БПЛА, оскільки це дозволяє знизити загальну вагу та збільшити тривалість польоту;

г) енергоспоживання: Мінімальне енергоспоживання є критичним для забезпечення тривалого часу роботи БПЛА без необхідності частотої підзарядки.

Для забезпечення ефективного зв'язку в системах малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) важливо враховувати масу та габарити бортового приймально-передавача й антен-фідерного пристрою (АФП). Вибір частотного діапазону надвисоких частот (НВЧ) є оптимальним, оскільки дозволяє створювати компактні антени, що можуть бути інтегровані в крило. Внутрішнє компонування малого БПЛА не дозволяє використовувати потужні приймально-передавачі з короткими антенами ультракороткохвильового діапазону (УКХ) через проблеми з електромагнітною сумісністю та значний вплив навколишніх об'єктів на характеристики антени. Частотний діапазон 2,4 ГГц є одним із прийнятних варіантів, проте безліцензійна робота в цьому діапазоні дозволена тільки для внутрішнього обладнання, тому потрібно розглянути можливості отримання ліцензії [1,2].

Для систем зв'язку середніх і великих БПЛА висуваються більш суворі вимоги до дальності роботи, стійкості до завад та ймовірності бітової помилки. У таких випадках доцільно використовувати комбіновану систему зв'язку, що включає кілька каналів, працюючих у різних частотних діапазонах (рис. 1.1).

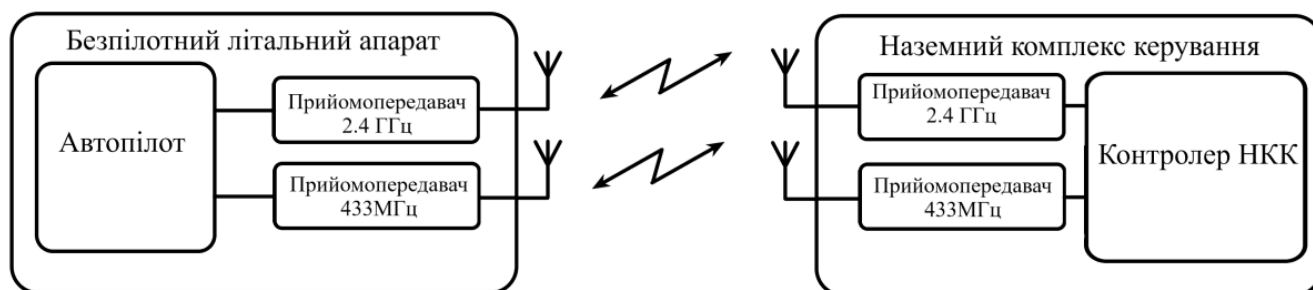


Рисунок 1.1 – Приклад комбінованої системи зв'язку

Під час роботи системи зв'язку (рис. 1.1) проводиться оцінка ймовірностей бітової помилки для кожного каналу зв'язку, на підставі чого приймається рішення про розподіл командно-телеметричного потоку даних між каналами. Використання декількох каналів зв'язку підвищує надійність передачі даних та знижує ймовірність збоїв, забезпечуючи ефективне використання радіочастотного спектра. Один із способів підвищення ефективності комплексної системи зв'язку полягає у адаптивній роботі системи, яка передбачає передачу даних про поточне навантаження по командно-телеметричних каналах зв'язку, обсяг яких змінюється залежно від умов передачі даних.

Максимальна відстань прямого радіозв'язку між БПЛА та наземним комплексом керування (НКК) на сьогодні не перевищує 100 км. Для забезпечення командно-телеметричної системи зв'язку на великих відстанях можливе використання супутникового зв'язку. У такому разі потік даних обмежується мінімально необхідною інформацією з БПЛА, інтенсивність якої може варіюватися, наприклад, від 30 до 300 секунд.

1.2 Взаємне розташування БПЛА та наземного комплексу управління

Розглянемо можливі сценарії розташування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземного комплексу керування (НКК) (рис. 1.2). Для забезпечення надійного зв'язку на великих відстанях необхідно збільшити відстань до радіогоризонту для обох антен — наземної і бортової. Максимальна дальність радіозв'язку (без урахування атмосферної рефракції) визначається сумою відстаней до радіогоризонту для антен НКК та БПЛА. Повітряний простір умовно поділяється на зони освітленості, півтіні та тіні (рис. 1.2). Зона півтіні (де знаходиться БПЛА №1) є перехідною між зоною освітленості (де знаходиться БПЛА №2), де ще можливий надійний прийом, і зоною тіні, де прийом можливий лише завдяки дифракції сигналу навколо земної кулі.



Рисунок 1.2 – Зони освітленості, півтіні та тіні

Як правило, антена НКК є мобільною та встановлюється на висоті не більше 10 м. На рис. 1.3 показано залежність максимальної дальності радіозв'язку від висоти польоту БПЛА при деяких заданих висотах підйому антени НКК.

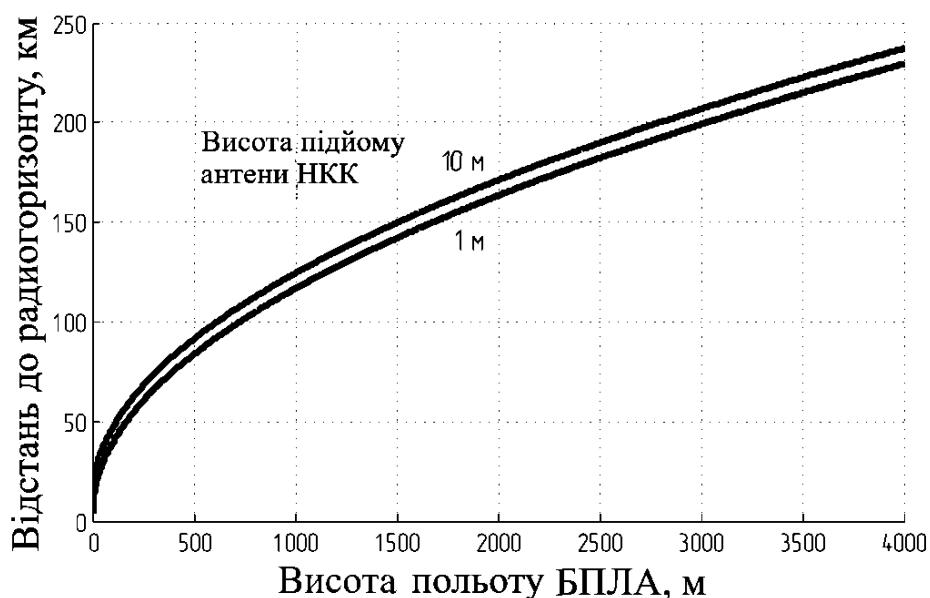


Рисунок 1.3 – Максимальна дальність зв'язку залежно від висоти підйому антени БПЛА та НКК

Без урахування рефракції в атмосфері та за відсутності перешкод на шляху розповсюдження радіохвиль існує можливість організації прямого зв'язку між БПЛА та НКК на відстані до 200 та 300 км. Для підвищення дальності роботи

системи зв'язку необхідно збільшувати висоту польоту БПЛА та використовувати щоглові споруди для антени НКК. Велика відстань між БПЛА та НКК призводить до великого загасання сигналу на лінії (рис. 1.4), яке необхідно компенсувати підвищенням вихідної потужності сигналу передавачів та використанням антенних систем з більшим коефіцієнтом посилення [1,3].

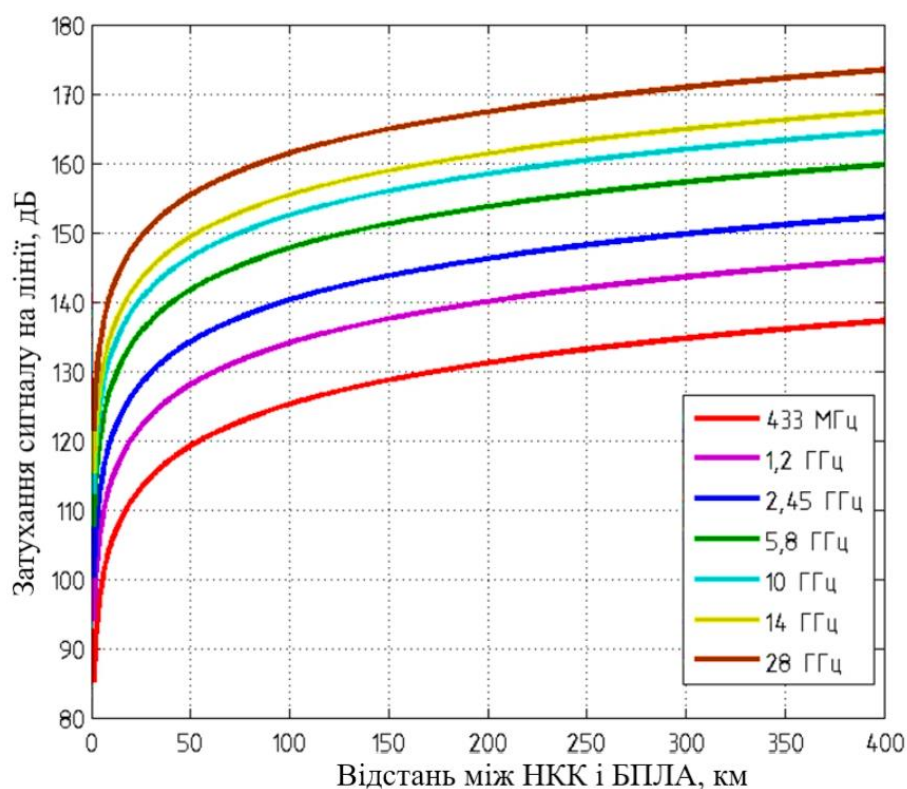


Рисунок 1.4 – Затухання сигналу на лінії для різних діапазонів довжини хвиль, за умов різних відстаней між БПЛА та НКК

Як видно з рис. 1.3, залежність максимальної дальності зв'язку від висоти встановлення антени НКК є слабкою. Тому висота щогли для наземної антени визначається необхідністю зниження впливу багатопроменевості та врахування можливих перешкод на шляху розповсюдження сигналу (рельєф місцевості, будівлі).

Залежно від робочої дальності польотів БПЛА, для наземного комплексу керування (НКК) використовуються або антени з великим коефіцієнтом направленої дії (КНД), або слабонаправлені антени. Антени з високим КНД вимагають використання опорно-поворотного пристрою та системи відстеження

БПЛА, оскільки ширина основного променя діаграми направленості (ДН) таких антен, зазвичай, менше 10° . Оскільки до наземного обладнання не висуваються жорсткі вимоги щодо маси та габаритів, використання скануючих цифрових антенних решіток (АР) для НКК не завжди виправдано через їх високу вартість, за винятком випадків, коли АР використовуються для одночасного відстеження декількох БПЛА[3].

1.3 Виявлення об'єктів за допомогою датчиків БПЛА

Датчики БПЛА – це різні пристрої, які можуть вимірювати стан руху, інформацію про положення та параметри середовища БПЛА. Вони є важливими компонентами для досягнення автономного польоту та виконання місії. Використання БПЛА залежить від різних факторів, таких як вантажопідйомність, розмір, вартість, безпека, середовище, рівень резервування та рівень автономності. Відповідно до різних принципів вимірювання та функцій, розглянемо чотири сенсорні технології, які важливі для виявлення об'єктів БПЛА:

а) візуальні датчики: візуальний датчик – це пристрій, який використовує фотоелектричні датчики для отримання зображень об'єктів. За допомогою зображення можна обчислити інформацію про стан, наприклад розташування та швидкість об'єкта. Для візуальних датчиків важливішим є алгоритм обробки. Останнім часом розробка алгоритмів глибокого навчання принесла більш широке застосування візуальним датчикам;

б) ультразвуковий датчик: ультразвукові хвилі — це звукові хвилі, частота яких перевищує 20кГц. Завдяки хорошій спрямованості та сильному проникненню вони широко використовуються для вимірювання відстані та швидкості. Ультразвуковий датчик випромінює сигнал, який відбивається об'єктом, а потім приймається іншим ультразвуковим датчиком. Ультразвуковий датчик, як правило, дешевий, але його недоліки включають низьку швидкість оновлення даних і обмежений діапазон вимірювань;

в) лазерний датчик: принцип роботи лазерного датчика в основному такий самий, як і датчика, за винятком іншого випромінюваного сигналу. Лазерне джерело випромінюється лазерним датчиком дальності зі швидкістю світла, що робить частоту сигналу набагато вищою, ніж ультразвуковий датчик. Недоліками є висока ціна, малий діапазон вимірювань, можливість сканування;

г) ґрунтопроникаючий радар: Ґрунтопроникаючий радар (GPR) є популярним методом неруйнівного контролю для виявлення об'єктів і отримання зображень під час геологічних досліджень. Швидке й точне виявлення об'єктів на поверхні може скоротити час обчислень і вимоги до обладнання;

д) тепловізор: тепловізор – це пристрій, який може перетворювати невидиме інфрачервоне випромінювання у видиме зображення. Він може виявляти розподіл температури та теплові аномалії об'єктів у темних або поганих умовах видимості звичайної камери.

У звичайному вигляді набори даних, які використовуються для алгоритмів виявлення об'єктів, здебільшого знімаються портативними камерами або фіксованими позиціями, тому більшість зображень є видами збоку. Однак аерофотознімки БПЛА відрізняються від характеристик звичайних зображень, оскільки вони зроблені з вигляду зверху вниз. Це означає, що алгоритми виявлення об'єктів у звичайному виді не можуть бути безпосередньо застосовані до аерофотозйому БПЛА[4,5,6,7].

По-перше, на якість аерофотознімків БПЛА впливає багато факторів, таких як нестабільність обладнання, що спричиняє тремтіння, розмитість, низьку роздільну здатність, зміну освітленості, спотворення зображення тощо. Ці проблеми потрібно попередньо обробити для відео, щоб покращити ефект виявлення методів.

По-друге, щільність об'єкта на аерофотозйомці непостійна, а розмір дуже малий. Наприклад, пішоходи та автомобілі можуть займати багато пікселів у звичайному вигляді, але лише кілька пікселів у виді з висоти пташиного польоту, і вони розподіляються нерівномірно, спричиняючи деформацію об'єктів,

ускладнюючи виявлення кількох об'єктів і вимагаючи спеціальних мережевих модулів для вилучення необхідної інформації.

Також оклюзія в аерофотозйомці також відрізняється від оклюзії в звичайному виді. У нормальному вигляді об'єкт може бути закритий іншими об'єктами, наприклад людиною перед автомобілем. Однак при зйомці з повітря об'єкт може бути закритий навколишнім середовищем, таким як будівлі та дерева. В обробці зображень оклюзія може створювати труднощі для алгоритмів розпізнавання об'єктів, оскільки частина інформації про об'єкт прихована. Тому важливо розробляти алгоритми, які можуть ефективно працювати в умовах оклюзії.

1.4 Проблеми виявлення об'єктів БПЛА

Завдання виявлення об'єктів на зображеннях дистанційного зондування БПЛА стикається з багатьма проблемами, такими як обертання об'єкта, складний фон, збільшення проблем із малими об'єктами, низька ефективність виявлення, спричинена змінами масштабу, а також розріджений і нерівномірний розподіл категорій об'єктів, наприклад:

Проблема збільшення дрібних об'єктів: масштабний діапазон об'єктів на зображеннях з БПЛА є дуже великим. Будівлі, пішоходи, гори та тварини часто з'являються на одному зображенні. Дрібні об'єкти займають дуже малу частку зображення, що ускладнює їх виявлення. Метод багатомасштабного злиття ознак може ефективно вирішити проблему збільшення дрібних об'єктів, виявляючи об'єкти різного розміру на різних рівнях ознак.

Проблема фонові складності: щільні області об'єктів на зображеннях БПЛА містять багато ідентичних елементів, що збільшує ймовірність помилкового виявлення. Крім того, велика кількість шумової інформації на фоні зображень БПЛА також може послабити або затемнити об'єкт, ускладнюючи безперервне та повне виявлення. Щоб підвищити точність виявлення та

надійність у складному фоні, можна використовувати механізми уваги та графові нейронні мережі для покращення зв'язків між об'єктами.

Проблема дисбалансу категорій: об'єкти на зображеннях, зроблених БПЛА, можуть мати проблеми дисбалансу категорій, наприклад наявність великої кількості об'єктів в одній категорії та невеликої кількості об'єктів в іншій категорії, що призводить до того, що детектор схиляється до прогнозування категорій з великою кількістю об'єктів. Генеративні змагальні мережі або автокодери можна використовувати для підвищення різноманітності та якості даних, що зменшить проблеми, пов'язані з дисбалансом даних і шумом.

Проблема обертання об'єкта: на зображеннях БПЛА об'єкти можуть з'являтися в будь-якій позиції та напрямку. Традиційні алгоритми виявлення об'єктів зазвичай припускають, що об'єкт розташований горизонтально, але на зображеннях БПЛА об'єкт можна повертати під будь-яким кутом. Крім того, об'єкти, що обертаються, можуть змінювати свою форму та вигляд на зображенні, через що алгоритм виявлення об'єктів на основі форми та зовнішнього вигляду не працює точно. Для адаптації до будь-якого кута об'єкта можна використовувати обертальні або полігональні рамки для його представлення[6,7].

1.5 Метод виявлення об'єктів БПЛА на основі глибокого навчання

Розробку алгоритмів виявлення об'єктів можна розділити на два етапи: традиційні алгоритми виявлення об'єктів і алгоритми виявлення об'єктів на основі глибокого навчання. Алгоритми виявлення об'єктів, засновані на глибокому навчанні, далі поділяються на два основні технічні маршрути: одноетапні та двоетапні алгоритми.

Одноетапне виявлення об'єктів БПЛА – це метод, який використовує методи глибокого навчання для прямого прогнозування розташування та категорії БПЛА на основі зображень. Одноетапним алгоритмам виявлення об'єктів потрібно лише один раз обробити зображення, щоб отримати

інформацію про класифікацію та місцезнаходження об'єкта. Таким чином, одноетапні алгоритми виявлення об'єктів мають високу швидкість, що може бути застосовано до сценаріїв із високими вимогами до реального часу цей алгоритм носить назву YOLO (You Only Look Once). Він ділить вхідне зображення на сітки фіксованого розміру, і кожна сітка передбачає певну кількість обмежувальних рамок, балів достовірності та ймовірностей для категорії об'єктів. Пізніше був розроблений інший алгоритм SSD (Single Shot MultiBox Detector). Алгоритм SSD генерує набір обмежувальних рамок за замовчуванням за допомогою згорткових фільтрів на різних масштабах карт функцій і передбачає категорію та зсув позиції об'єкта в рамці. На рис. 1.5 показано порівняння структур алгоритмів Yolo та SSD [8].

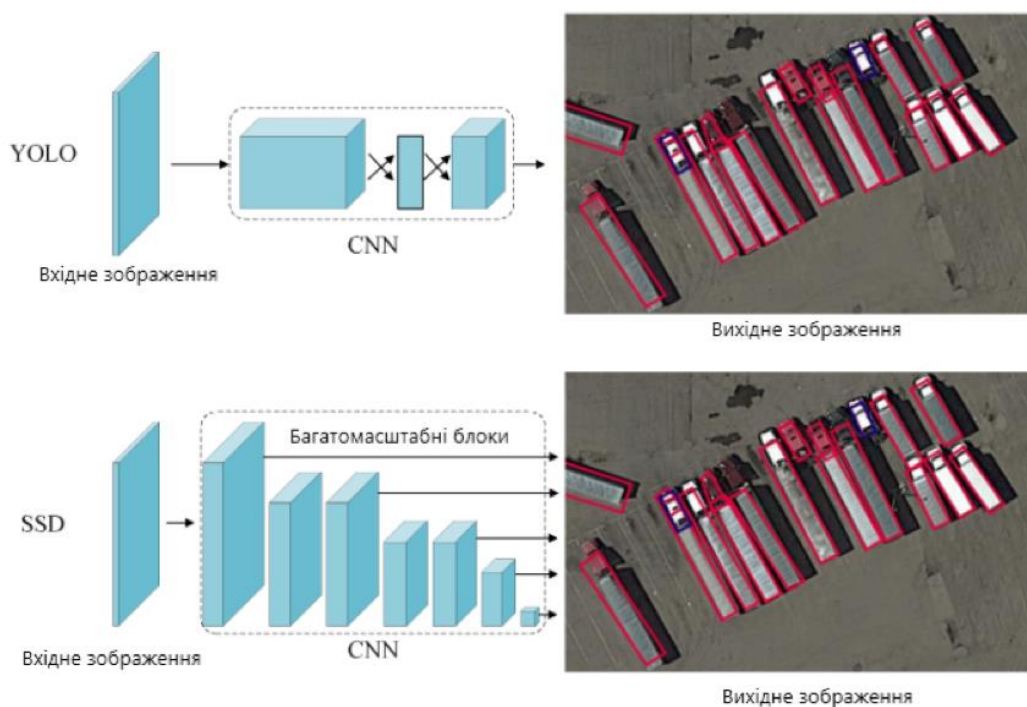


Рисунок 1.5 – Порівняння алгоритму YOLO та SSD

Двоетапне виявлення об'єкта БПЛА – це метод, який виконує класифікацію для визначення категорій після пропозиції областей інтересу. Двоетапний метод має більш високу точність, ніж одноетапний метод, оскільки область інтересу локалізується та класифікується двоступеневим детектором з першого ступеня. Однак двоетапний метод потребує більше часу для висновку,

ніж одноетапний метод через додаткові регіони та етапну обробку. Алгоритму R-CNN із значно покращеною продуктивністю виявлення використовував модуль Spatial Pyramid Pooling (SPP) у CNN, який вирішує проблему обмеження зображень фіксованого розміру та дозволяє уникнути повторного вилучення характеристик зображення.

Щоб вирішити проблему, пов'язану з тим, що алгоритм R-CNN має значну надлишковість і повільно працює в операції виділення ознак, було запропоновано швидкий R-CNN з використанням об'єднання регіонів інтересу (ROI) на основі R-CNN і SPP - Структура мережевого алгоритму для досягнення наскрізного виявлення. Метод Faster R-CNN, який замінює алгоритм вибіркового пошуку мережею пропозицій регіону (RPN) для більш ефективного створення регіонів-кандидатів. Мережа додатково покращує швидкість виявлення за рахунок спільного використання згорткових функцій[9].

1.6 Класифікація БПЛА за конструкцією

Як відомо, конструкція літального апарата (ЛА) залежить від принципу створення підйомної сили, яка лежить в основі його польоту. Відомі такі принципи польоту:

- а) балістичний;
- б) аеродинамічний;
- в) ракетодинамічний (реактивний);
- г) аеростатичний.

Балістичний принцип польоту - це політ вільно кинутого тіла, який відбувається під дією сили тяжіння. Підйомна сила визначається силою інерції летючого тіла. Для здійснення польоту за балістичним принципом тіло повинно мати початковий запас висоти або швидкості, тому балістичний політ також називають пасивним.

Аеродинамічний принцип польоту заснований на третьому законі Ньютона, згідно з яким пластина, поміщена під певним кутом у повітряний потік, надавлює на нього і відчуває відповідний тиск з боку потоку.

Реактивний принцип польоту також заснований на третьому законі Ньютона, але взаємодія літального апарата з оточуючим його повітрям не є обов'язковою умовою. Сутність реактивного принципу полягає в тому, що необхідна для польоту підйомна сила створюється в результаті згорання палива, при якому утворюються гази з великою енергією. Ці гази, витікаючи з великою швидкістю із сопла двигуна назовні, створюють реактивну силу протилежного напрямку.

Аеростатичний принцип польоту заснований на законі Архімеда, згідно з яким на тіло, що знаходиться в газовому середовищі, діє підйомна сила, яка дорівнює вазі витісненого ним газу. За таким принципом літають дирижаблі, аеростати, повітряні кулі.

На сьогодні найбільш поширені конструкції безпілотних літальних апаратів (БпЛА), що використовують аеродинамічні та аеростатичні принципи створення підйомної сили.

Безпілотні літальні апарати (БпЛА) аеростатичного типу (рис.1.6) – це особливий клас БпЛА, у яких підйомна сила створюється переважно за рахунок архімедової сили, що діє на балон, заповнений легким газом (зазвичай гелієм). Цей клас представлений головним чином безпілотними дирижаблями – літальними апаратами легше повітря, які являють собою комбінацію аеростата з руховою установкою (зазвичай це гвинт з електродвигуном або ДВЗ) і системою управління орієнтацією. Основним недоліком цього типу БпЛА є низька маневреність, тому вони зазвичай застосовуються у прив'язному варіанті (на тросі).



Рисунок 1.6 – Приклад БПЛА аеростатичного типу

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) літакового типу (рис.1.7) – це клас БПЛА, у яких підйомна сила створюється аеродинамічним способом за рахунок потоку повітря, що набігає на нерухоме крило. БПЛА літакового типу зазвичай відрізняються тривалою тривалістю польоту, великою максимальною висотою польоту та високою швидкістю. Недоліками БПЛА літакового типу є необхідність використання пускових установок, злітно-посадкових смуг, а також неможливість зависання в повітрі на одному місці.



Рисунок 1.7 – Приклад БПЛА літакового типу

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) вертолітного типу (рис.1.8) – це клас БПЛА, у яких підйомна і рушійна сили на всіх етапах польоту створюються одним або кількома несучими гвинтами з приводом від одного або кількох двигунів. Крило або відсутнє зовсім, або виконує допоміжну роль. Очевидними перевагами БПЛА вертолітного типу є здатність зависання в точці та висока

маневреність. Основним недоліком вертолітної схеми БПЛА є невисока швидкість польоту.



Рисунок 1.8 – Приклад БПЛА вертолітного типу

Безпілотні літальні апарати з гібридною конструкцією (рис. 1.9) – це клас БПЛА з вертикальним злетом і посадкою. Під цими апаратами розуміються всі БПЛА, які здатні контролювано змінювати напрямок вектора тяги та поєднують у собі конструкційні принципи літака і квадрокоптера. Вони мають переваги вертикального злету завдяки наявності додаткових двигунів, встановлених у горизонтальній площині, і одночасно можуть розвивати високу швидкість завдяки аеродинамічній схемі з нерухомим крилом за рахунок штовхаючого або тягнучого гвинта.



Рисунок 1.9 – Приклад БПЛА з гібридною конструкцією

Безпілотні літальні апарати мультироторного типу (рис. 1.10) – особливий клас БПЛА вертолітного типу. Мультикоптер (багатороторний вертоліт) – це літальний апарат, побудований за вертолітною схемою, з трьома і більше

несучими гвинтами. Їхніми перевагами є відносно низька вартість, легкість в управлінні, можливість вертикального злету з невідготовленої площадки та здатність зависання в повітрі, а також висока точність позиціонування. Недоліками є низька швидкість, високі енергозатрати, обмежений радіус дії, нетривалий час польоту.

Існує кілька різновидів мультикоптерів, що розрізняються кількістю та розташуванням двигунів щодо центру апарата: бікоптер, трикоптер, квадрокоптер, гексакоптер, октокоптер.



Рисунок 1.10 – Приклад БПЛА муьтироторного типу

Квадрокоптер – найпопулярніший мультикоптер, оскільки чотири – це оптимальна кількість електродвигунів для балансу ціни, продуктивності, стабільності та часу польоту.

2 СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ТА ПРИЙОМУ ВІДЕОСИГНАЛУ З БПЛА

2.1 Види систем прийому та передачі відеосигналу

Система передавання та прийому відеосигналу призначена для передавання відеосигналів оператору від відеокамери FPV-дрона і складається з наступного обладнання:

- а) FPV-окуляри з відеоприймачем;
- б) відеопередавач FPV-дрона.

FPV-окуляри (Smart окуляри) або FPV-шолом – це пристрій, на який у режимі реального часу передається відеопотік із відеопередавача, розміщеного на БПЛА, і який відображає отриману відеоінформацію на вбудованому дисплеї. Відеоприймач (video receiver/VRX), що приймає відеосигнал від БПЛА, може бути вбудований в окуляри або підключений як зовнішній модуль. Джерелом відеоінформації є курсова відеокамера, розміщена на БПЛА.

FPV-шоломи, як правило, мають прямокутну витягнуту форму і кріпляться на голові двома ремінцями. У середині знаходиться екран і велика лінза (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – FPV-шолом

Використання FPV-окулярів, шоломів, дозволяє створити реалістичне занурення в політ «від першої особи». Крім того, існує можливість прийому відеосигналу на окремий FPV-монітор (рис. 2.2).

FPV-монітор (екран) являє собою дисплей, що входить до складу відеоприймача з приймальними антенами. Монітор, для зменшення впливу сторонніх джерел світла на якість зображення, обладнаний навісом. Для гоночних FPV-дронів окремі екрани не використовуються.



Рисунок 2.2 – Приклад FPV-монітору

Основними характеристиками FPV-шоломів є:

- роздільна здатність екрану (наприклад, 1280×720, 800×400, 480×272, 500×300 – чим більше зазначені числа, тим краще);
- кут огляду окулярів FPV (FOV) – кут, який визначає розмір видимого зображення;
- наявність вбудованого відеоприймача;
- частота приймача (кількість підтримуваних каналів) (наприклад, 40 каналів, 32 канали, 5,8ГГц);
- функція Diversity (наявність двох рознесених приймачів, які приймають сигнал, і система, яка обирає кращий з них);

- співвідношення сторін – співвідношення ширини до висоти екрану (наприклад, 16:9, 4:3);
- наявність DVR (відеореєстратора для запису відео);
- розмір і вага;
- час роботи від акумулятора та його наявність;
- вентилятор для запобігання запотіванню екранів і лінз окулярів;
- наявність функції відстежування голови (Head tracking);
- наявність HDMI роз'єму для підключення окулярів до монітора;
- підтримка перегляду 3D відео;
- відеовхід – для підключення зовнішнього приймача.

Якщо в шоломі або окулярах встановлені рознесені приймачі, тоді сигнал прийматиметься окремо на кожну антену і синхронізуватиметься, підвищуючи загальну якість відображуваного зображення. З рознесеними приймачами використовуються різні антени, зазвичай це дипольна та грибовидна (кругова) поляризація, набагато рідше використовують монопольну або лінійну.

2.2 Модуль відеопередавача БПЛА

Модуль відеопередавача FPV-дронів – це пристрій, який отримує відеосигнал з камери FPV-дрона, перетворює його у відеосигнал певної частоти і передає на відеоприймач, що знаходиться, наприклад, у шоломі.

Основні характеристики модуля відеопередавача:

а) вихідна потужність відеопередавача (Power Output) – це кількість енергії, що випромінює відеопередавач під час роботи. Чим вища потужність передавача, тим більша площа покриття радіосигналом і дальність застосування FPV-дрона. Але при цьому збільшується кількість перешкод для інших операторів БПЛА;

- 25 мВт – стандарт для більшості гоночних квадрокоптерів, зазвичай не створює значних перешкод іншим пілотам. Дистанція застосування зазвичай не перевищує 100 метрів;

- 200 мВт – стандартна потужність для польотів на короткі дистанції, зазвичай до 500 метрів;

- 600 мВт – потужність для польотів на дальні дистанції. Відеопередавач при цьому буде сильно нагріватися і створювати перешкоди іншим пілотам.

Сучасні відеопередавачі мають можливість регулювання вихідної потужності сигналу, що дозволяє зручно використовувати дрон у приміщенні (25 мВт) і поза приміщеннями (200 або 400 мВт). Вища потужність швидше розряджає акумулятор через зростання енергоспоживання;

б) основні робочі частоти відеопередавача: 5,8 ГГц; 2,4 ГГц; 1,2 ГГц;

Більшість сучасних відеопередавачів працюють на частоті 5,8 ГГц, що підвищує пропускну здатність каналу. Але через кращу перешкодостійкість і дальність, відеопередавачі на частоті 1,2 ГГц стають популярнішими;

в) підтримка каналів відеопередавача – частина загального частотного діапазону, в межах якого виділяються автономні частоти для незалежного управління БПЛА. Це дозволяє одночасно керувати польотами до 40 і більше пілотів, кожен з яких використовує свою робочу частоту в околицях частоти 5,8 ГГц. Канал зазвичай відображається на маленькому екрані.

Існують 4 механізми перемикання між каналами:

- 1) DIP (механічний);
- 2) кнопка з дисплеєм;
- 3) інфрачервоний пульт;
- 4) через OSD.

DIP вже застарів і використовується лише в старих відеопередавачах. Кнопка з дисплеєм – найпопулярніший варіант. Інфрачервоний пульт дозволяє дистанційно вибрати потрібний канал. OSD (SmartAudio, Tramp Telemetry) – функція для вибору каналу через меню на дисплею окулярів або шолома.

г) сумісність відеопередавача з апаратурою визначається наявністю груп і каналів (А-1, В-3 тощо);

д) габарити і вага (форм-фактор) – це розмір плати передавача. Зазвичай це мініатюрні пристрої, але все частіше виробники роблять відеопередавачі

розміром 30x30мм. Це стандартний розмір польотного контролера, тому ПК і відеопередавач встановлюються один над одним. Вага має значення для збірки міні- і мікродронів;

е) тип сигналу відеопередавача може бути аналоговим або цифровим. Цифрові відеопередавачі передають відео з кращою якістю, але вони дорожчі. В цифрових FPV-системах можуть виникати затримки через процеси стиснення зображення. Аналогові передавачі не мають затримок, не втрачають кадри або сегменти зображення при зашумленості сигналу;

ж) роз'єм для антени відеопередавача має різні коннектори: SMA, uFL, MMCX.

- SMA – стандартний, великий роз'єм з різьбою, дуже популярний;

- uFL – менший коннектор для компактних збірок, що фіксується за допомогою заціпки;

- MMCX – новіший роз'єм, поєднує довговічність SMA і малі розміри uFL;

з) вбудований мікрофон (Internal Microphone) записує звук і передає його в FPV-шолом або окуляри;

и) корпус відеопередавача зазвичай виготовляється у вигляді друкованої плати в термоусадці або в корпусі з алюмінію (пластику). Відеопередавачі розміщуються всередині рами дрона для захисту;

і) напруга живлення відеопередавача має строго задане значення, зазначене в технічному описі. Неправильно обране значення напруги може призвести до шуму на відео, артефактів і навіть виходу відеопередавача з ладу[7,8].

2.3 Приклади систем передачі даних

Система EnerLinksIII (рис. 2.3) — це програмований модем для тактичних систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА), розроблений компанією Enerdyne. Система забезпечує передачу відео- та інших даних у режимі прямої

видимості, що дозволяє використовувати її у військових і цивільних додатках для зв'язку з БПЛА. Основні характеристики включають:

а) частотні діапазони роботи (L-діапазон: в межах від 1700 до 1850 МГц, S-діапазон: в межах від 2200 до 2500 МГц, нижній С-діапазон: в межах від 4400 до 4950 МГц, верхній С-діапазон: в межах від 5250 до 5850 МГц);

б) швидкість передачі даних (до 11 Мбіт/с на відстані 75 морських миль, до 5 Мбіт/с на відстані до 100 морських миль, з перспективою підвищення до 22 Мбіт/с);

в) типи переданих даних (аналогове відео у форматах NTSC, PAL, RS170, можливість роботи з цифровими методами модуляції);

г) ширина смуги пропускання (для швидкості 10 Мбіт/с складає менше 12 МГц на рівні -20 дБс та менш ніж 24 МГц на рівні -50 дБс);

д) роздільна здатність відео (NTSC: 560×480 пікселів, PAL: 550×576 пікселів).

Наземне обладнання оснащено дзеркальною параболічною антеною діаметром 24 дюйми з автоматичним стеженням за БПЛА, для близьких відстаней використовуються всеспрямовані антени з автоматичним перемиканням. Система підтримує перепрограмування для використання цифрових методів модуляції, що підвищує її універсальність. Застосування стандарту H.264 забезпечує передавання двох каналів відеоданих зі швидкістю до 3,5 Мбіт/с. EnerLinksIII забезпечує ефективний та надійний зв'язок з БПЛА, що робить її перспективним рішенням для реалізації тактичних завдань, а також використання в інноваційних технологічних проектах.

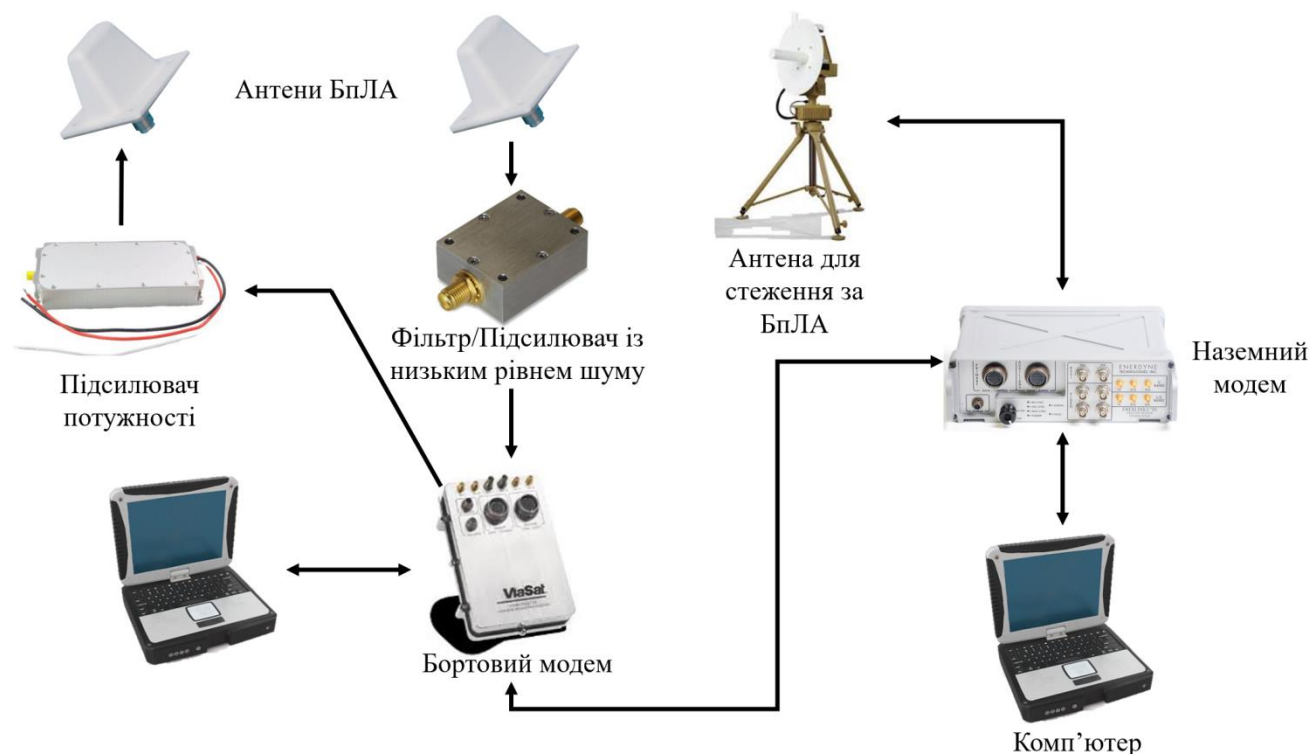


Рисунок 2.3 – Конфігурація системи EnerLinksIII для С-діапазону

Не зважаючи на свою розповсюдженість, системи EnerLinksIII мають деякі обмеження, які варто враховувати при використанні.

По-перше, її продуктивність залежить від умов прямої видимості між БПЛА та наземною станцією, що обмежує застосування в складних географічних умовах або при наявності перешкод.

По-друге, максимальна швидкість передачі даних (11 Мбіт/с) може бути недостатньою для сучасних задач, які потребують більш високої пропускної здатності.

По-третє, для забезпечення стабільного з'єднання на великих відстанях (до 100 морських миль) може знадобитися додаткове енергозабезпечення або використання антен з високим коефіцієнтом підсилення.

Також система не забезпечує повної захищеності від радіоелектронних перешкод, що може бути критичним у критичних ситуаціях.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) і C-OFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) є перспективними методами модуляції сигналів, які забезпечують високу спектральну ефективність та

стійкість до перешкод, що робить їх придатними для використання у зв'язку з безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Ці технології вирішують низку ключових проблем, зокрема ефективне використання обмеженого радіочастотного спектру, зменшення впливу багатопроменевого поширення сигналів, що є типовим для складного рельєфу місцевості, та адаптацію передачі даних до умов змінного радіоканалу. OFDM забезпечує поділ сигналу на кілька ортогональних піднесучих, що мінімізує взаємні інтерференції між ними, а також дозволяє використовувати вузькі смуги частот, підвищуючи стійкість до затухань і шумів. У свою чергу, С-OFDM, завдяки використанню кодованих сигналів, підвищує надійність передачі даних навіть за умов високих рівнів шумів та електромагнітних перешкод. Ці властивості роблять OFDM і С-OFDM важливими технологіями для вирішення завдань, пов'язаних із забезпеченням стабільного і високошвидкісного зв'язку в умовах реального часу.

Одним із перших масштабних проєктів із дослідження можливостей OFDM для зв'язку з БПЛА став проєкт MinuteMan (рис. 2.4), що реалізовувався в період з 2000 по 2005 рік за підтримки Військово-морських сил США.

Метою проєкту було створення інтелектуальної мобільної безпроводової мережі зв'язку "інтернет у небі", яка забезпечує передачу голосу, відео, зображень і даних у реальному часі з адаптивним управлінням якістю обслуговування (QoS). Основними технічними досягненнями проєкту стало впровадження фундаментальних основ побудови відмовостійкої системи зв'язку, яка здатна до самореконфігурації, а також розробка підходів для динамічного розподілу ресурсів та управління завданнями у реальному часі. Завдяки застосуванню адаптивних технологій С-OFDM, проєкт MinuteMan забезпечив високу якість зв'язку з БПЛА навіть за умов значного доплерівського зсуву частоти і багатопроменевого поширення сигналів, що робить його важливим кроком у розвитку сучасних систем безпроводного зв'язку.



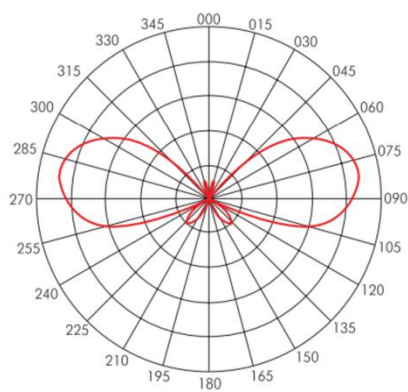
Рисунок 2.4 – Сутність проекту MinuteMan

Широкому поширенню OFDM сприяв вибір цієї технології модуляції сигналів як фізичної основи створення тактичних широкосмугових мереж (Wideband Networking Waveform, WNW) у рамках програми Joint Tactical Radio System (JTRS).

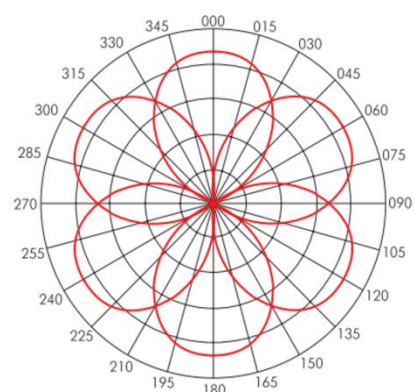
Для одночасного зв'язку з кількома БПЛА в найпростішому випадку використовуються кодовані OFDM-сигнали. Наприклад, фірма Cobham Surveillance (GMS Products, www.gmsinc.com) просуває систему зв'язку на основі сигналів DVB-T з модуляцією C-OFDM і шестигранною антенною решіткою. Система функціонує в діапазоні від 1,7 до 1,85 і від 1,99 до 2,5 ГГц. Її приймач дає змогу забезпечити зв'язок із мобільними джерелами сигналів. Так, за 2048 номінальних піднесучих і модуляції піднесучих методом 16-QAM допустимий доплерівський зсув частот до 570 Гц, що відповідає максимальній швидкості взаємного руху передавача і приймача сигналів 280 км/год за умови центральної несучої 2,2 ГГц. Кожна з шести панелей антени (рис. 2.5) працює з сигналами вертикальної поляризації, коефіцієнт посилення - 12 дБ, діаграма спрямованості - 53° за азимутом і 20° за кутом місця (на рівні -3 дБ)[7,8,9].



а)



б)



в)

Рисунок 2.5 – Антенна система фірми Global Microwave System (а), перерізи її діаграм спрямованості у вертикальній (б) і горизонтальній (в) площинах при куті 10°

3 СТАНДАРТНІ ПРОТОКОЛИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З БОРТУ БПЛА

3.1 Вимоги до систем передачі даних з БпЛА

Основа вимог до каналів передачі даних - якість мультимедійної інформації. Вона характеризується розрядністю і формою пікселів, їхньою кольоровістю, а також кількістю пікселів у кадрі зображення, частотою кадрів, форматом кадру (співвідношенням сторін), ступенем стиснення зображення, імовірністю появи помилкових пікселів у кадрі, типом зображень та їхнім вмістом. Звісно, для зниження необхідної швидкості передавання даних у режимі повітряної зйомки може використовуватися і покадрове передавання фотознімків замість потокового відео, однак при цьому необхідна додаткова ідентифікація цілей, особливо тих, що рухаються або маневрують. Сказане стосується не тільки телевізійних, а й радіолокаційних зображень. Крім того, завдання ідентифікації ускладнюється коливаннями платформи БПЛА. Перехід до відеоданих дає змогу спростити ідентифікацію рухомих цілей, тому передача цифрових відеопотоків стала стандартною вимогою до бортових сенсорів сучасних БПЛА.

Спільноти користувачів НАТО виконують різноманітні місії, для яких необхідні різні системи формування рухомих зображень. Доступні користувачам смуги пропускання також різняться в широких межах. Тому стандарт STANAG 4609 класифікує всю сукупність МІ (Motion Imagery) за рівнями складності. Для цього в «Посібник із реалізації» AEDP-8 введено матрицю системи рухомих просторово-часових образів (MISM), що дає змогу віднести ту чи іншу систему МІ до певного рівня складності (MISM-Level). Матриця MISM (EG 0220) має шість загальних категорій, що охоплюють 15 рівнів МІ (MISM-L0 - MISM-L14) (табл. 3.1).

Окремі вузли системи в межах ланцюга обробки зображень можуть функціонувати на різних рівнях MISM-L, при цьому повна специфікація системи

визначається вузлом найнижчого з використовуваних рівнів MISM. У загальному випадку, що нижчий рівень у матриці, то нижча якість зображень, однак цього настільки однозначно не можна сказати про вимоги до пропускної здатності. Країни НАТО можуть застосовувати системи будь-якого рівня MISM, але здатність до взаємодії не гарантується для зображень, чий рівень складності перевищує MISM-L10.

Таблиця 3.1 – Рівні складності систем рухомих зображень

Категорія EG	Рівень складності	Характеристика систем МІ
0220a	12, 13, 14	Перспективні системи МІ з високою роздільною здатністю
0220b	9, 10, 11	Висока роздільна здатність
0220c	6, 7, 8	Покращена роздільна здатність
0220d	3, 4, 5	Стандартна роздільна здатність
0220e	1, 2	Вузька смуга пропускання
0220f	0	Низька просторова роздільна здатність

3.2 Вимоги до форматів відеозображень і до їх каналів передачі

Керівництво AEDP-8 докладно класифікує зображення за рівнями MISM, вказуючи вимоги щодо пропускної спроможності ліній зв'язку для неспотвореного передавання цифрового відео (телевізійного або радіолокаційного).

Як найбільш економічний варіант модернізації аналогових відеосистем фахівці розглядають перехід до цифрового відео підвищеної чіткості з прогресивною розгорткою і форматом зображення 720×480×60p (480p) або

720×576×50p (576p). Однак системи 576p і 480p не використовують квадратні пікселі, що призводить до різної роздільної здатності в горизонтальній і вертикальній площинах. Це не завжди прийнятно для військових систем і до того ж не дає змоги ефективно використовувати дисплеї формату 16:9, яким у найближчому майбутньому пророкують роль стандарту в додатках мультимедіа. Тому формати відеоданих підвищеної чіткості 576p і 480p можна розглядати лише для обмеженого класу відеосистем, сфера застосування яких не вимагає високої просторової або часової роздільної здатності і не потребує засобів відображення формату 16:9.

Усі інші наявні та заплановані до розроблення протягом найближчих 5-10 років відеосистеми військового призначення в країнах НАТО, зокрема для БПЛА, переводять на стандарт відео високої чіткості (HD) SMPTE 296M-2001 з прогресивною розгорткою і форматом зображення 1280×720×(50p) 60p. У STANAG 4609 зазначено також, що надалі, у міру вдосконалення технологій, очікується початок масового переходу на бойові відеозасоби формату 1920×1080×50p (60p), і лише в додатках на кшталт тренажерних засобів, які не потребують високого часового розділення, натомість можуть обмежено використовуватися MI формату Full HD 1920×1080×24p/25p/30p.

Орієнтована на перспективні відеозасоби максимальна за складністю категорія MI EG 0220a охоплює «просунуте» відео високої чіткості (Advanced HD) з роздільною здатністю щонайменше 1920×1080 пікселів і кадровою частотою 48-120 Гц. Глибина пікселів (розрядність подання) при цьому становить 8, 10 або 12 біт (понад 12 біт для MISM-L14). При цьому найвищий рівень складності MISM-L14 відведено сукупності форматів нестисненого відео (наприклад, стандарту RAW):

- 1920×1080×60p (50p) з відношенням сторін 16:9;
- 2048×1080×48p з відношенням сторін кадру 1.896;
- 1998×1080×48p з відношенням сторін 16,65:9;
- 2048×854×48p з відношенням сторін 2,39.

Для передавання нестисненого відеопотоку MISM-L14 потрібна пропускна здатність 3-4 Гбіт/с, доступна, наприклад, в оптоволоконному транспортному середовищі систем із синхронною цифровою ієрархією SONET рівня OC-96. Проте STANAG 4609 вказує, що рівень MISM-L14 охоплює системи формування, оброблення, управління, зберігання, архівування та розповсюдження МІ, призначені для розв'язання завдань збирання даних, розвідки та спостереження за полем бою.

Варто зазначити, що передбачена в цій категорії частота кадрів 120 Гц - це не щось абсолютно зайве. Наприклад, під час наведення засобів ураження на цілі, що маневрують, з борту ударного БПЛА з урахуванням його просторових еволюцій зазвичай потрібно до 30 команд управління на секунду. Оскільки для видачі кожної команди управління необхідно обробити, як правило, щонайменше чотири кадри зображення цілі, легко отримати потрібну швидкість потоку 120 кадрів на секунду.

Два інших рівні категорії EG 0220a описують потоки, аналогічні MISM-L14, але в помірно стислому (MISM-L13) і сильно стислому (MISM-L12) форматах. Вони призначені для обробки і транспортування сигналів просунутого HD-відео. Детальні характеристики рівнів MISM-L12 і MISM-L13 будуть уточнюватися надалі.

У категорії EG 0220b (табл. 3.2) глибина пікселів зображень високої чіткості обмежена 10 бітами. Нестислий відеопотік HD-відео рівня MISM-L11 охоплює формати з прогресивною розгорткою і співвідношеннями сторін кадру 16:9, їхня роздільна здатність - $1920 \times 1080 \times 30p$ (25p, 24p) і $1280 \times 720 \times 60p$ (50p, 30p, 25p, 24p). Номінальна пропускна здатність каналу зв'язку для передачі таких відеопотоків - 1,485 Гбіт/с. До появи радіоканалів із такою пропускною спроможністю такий рівень складності допустимий лише на початкових стадіях оброблення сигналів, що надходять безпосередньо з ПЗЗ-матриць відеосенсорів, або в лазерних каналах супутникового зв'язку, які проєктують для стратосферних БПЛА.

Таблиця 3.2 – Рівні складності МІ високої роздільної здатності

Рівень складності	Роздільна здатність по горизонталі, пікс.	Роздільна здатність по вертикалі, пікс.	Глибина пікселів, біт	Частота кадрів, Гц	Коефіцієнт стискання	Номінальна швидкість передачі даних, Мбіт/с	Діапазон швидкості передачі даних, Мбіт/с
MISM-L11	1280 – 1920	720 – 1080	8 або 10	24 – 60	0	1485	360 – 2400
MISM-L10M	1280 – 1920	720 – 1080	8	24 – 60	10:1	80	34 – 100
MISM-L10H	1280 – 1920	720 – 1080	8 або 10	24 – 60	20:1	40	17 – 50
MISM-L9M	1280 – 1920	720 – 1080	8	24 – 60	45:1	19.4	10 – 44.7
MISM-L9H	1280 – 1920	720 – 1080	8	24 – 60	80:1	10	5 – 20

Рівень MISM-L10, залежно від ступеня стиснення зображень, розбитий на два підрівні. Саме верхній з них, MISM-L10M, є граничним для гарантованої сумісності обладнання країн НАТО. Він передбачає використання 8-бітних пікселів з максимальною роздільною здатністю зображення 1920×1080×60p і середнім ступенем його стиснення від 5:1 до 10:1. Характерний приклад такого роду відеопотоків - MPEG-2. Необхідна пропускна здатність каналу передачі даних становить 34-100 Мбіт/с. Таким чином, у країнах НАТО взято курс на досягнення повної сумісності каналів передавання відеоданих високої чіткості з пропускною спроможністю до 100 Мбіт/с. Уже сьогодні подібні радіолінії - не екзотика у збройних силах країн НАТО. Наприклад, на виставці «TechDemo' 08» демонструвалися можливості радіолінії передачі даних системи ARDS німецької фірми OHB System з пропускною спроможністю до 274 Мбіт/с за віддалення від наземного приймального пункту до 200 км, що дає змогу передати з борта літального апарата Condor відеопотоки MISM-L10M одночасно від двох відеокамер формату Full HD.

Другий підрівень (MISM-L10H), завдяки 20-кратному стисненню, дозволяє застосовувати 10-розрядні пікселі. Для трансляції таких потоків достатньо каналів 50 Мбіт/с, які здатне надати транспортне середовище H.264 L4.1. Подальше стиснення потоку Full HD до 45:1 і 80:1 відповідає рівню MISM-L9. Підрівню MISM-L9H відповідає 8-розрядний формат пікселів і стиснення 80:1. Для передачі такого потоку достатньо радіолінії з номінальною пропускною спроможністю всього 10 Мбіт/с. Максимальна ж пропускна здатність у рамках MISM-L9H може бути підвищена до 20 Мбіт/с, що важливо для застосування стандартів DVB-T і H.264 L4.0.

Приблизно в ці ж рамки (10-25 Мбіт/с) вписуються і вимоги щодо передачі відео підвищеної чіткості зі стисненням 10:1 і максимальною роздільною здатністю $960 \times 576 \times 60p$, що відповідають рівню MISM-L7M. Істотно, що нестиснутий відеопотік підвищеної чіткості MISM-L8 вимагає вкрай високої пропускної здатності (135-540 Мбіт/с).

Оскільки нижчі рівні складності MISM (табл. 3.3 – 3.5) характеризують мало перспективні формати зображень, розглядати їх настільки ж детально не має сенсу. Зазначимо лише, що перехід до пропускної здатності менше ніж 1,5 Мбіт/с відповідає вузькосмуговим МІ категорії EG 220e (табл. 3.5) на підрівні MISM-L2.2H. Така пропускна здатність потрібна для 8-бітного відео з максимальною роздільною здатністю 720×576 , частотою кадрів 30 Гц і ступенем стиснення зображень 110:1.

Мінімальні вимоги до пропускної здатності визначаються рівнем 32 Кбіт/с (MISM-L1.0H) і відповідають архаїчним за якістю МІ з максимальною роздільною здатністю $176 \times 144p$, частотою зміни кадрів 12-15 Гц і ступенем стиснення 5200:1.

Нарешті, найнижчий рівень складності MISM-L0, як не дивно, знову повертається до роздільної здатності 1920×1080 і 12-розрядного представлення пікселів. При цьому завдяки стисненню 10:1 і швидкості оновлення зображень лише один або два кадри на секунду необхідна пропускна здатність обмежується на рівні від 56 до 512 Кбіт/с[9].

Таблиця 3.3 – Рівні складності МІ покращеної роздільної здатності

Рівень складності	Роздільна здатність по горизонталі, пікс.	Роздільна здатність по вертикалі, пікс.	Глибина пікселів, біт	Частота кадрів, Гц	Коефіцієнт стискування	Номінальна швидкість передачі даних, Мбіт/с	Діапазон швидкості передачі даних, Мбіт/с
MISM-L8	640 – 960	480 – 576	8 або 10	24 – 60	0	360	135 – 540
MISM-L7M	640 – 960	480 – 576	8	24 – 60	10:1	25	10 – 50
MISM-L7H	640 – 960	480 – 576	8	24 – 60	20:1	12	5 – 14
MISM-L6M	640 – 960	480 – 576	8	24 – 60	45:1	5.5	3 – 15
MISM-L6H	640 – 960	480 – 576	8	24 – 60	80:1	3	2 – 8

Таблиця 3.4 – Рівні складності МІ стандартної роздільної здатності

Рівень складності	Роздільна здатність по горизонталі, пікс.	Роздільна здатність по вертикалі, пікс.	Глибина пікселів, біт	Частота кадрів, Гц	Коефіцієнт стискування	Номінальна швидкість передачі даних, Мбіт/с	Діапазон швидкості передачі даних, Мбіт/с
MISM-L5	720	480i – 576i	8 – 10	24 – 60	0 – 2.5:1	270	270 – 360
MISM-L4M	720	480i – 576i	8	24 – 30	5.5:1 – 10:1	15	10 – 20
MISM-L4H	720	480i – 576i	8	24 – 30	5.5:1 – 20:1	10	5 – 10
MISM-L3M	720	480i – 576i	8	24 – 30	28:1	6	3 – 10
MISM-L3H	720	480i – 576i	8	24 – 30	28:1	3	1.5 – 5

Таблиця 3.5 – Рівні складності МІ низької роздільної здатності

Рівень складності	Роздільна здатність по горизонталі, пікс.	Роздільна здатність по вертикалі, пікс.	Глибина пікселів, біт	Частота кадрів, Гц	Коефіцієнт стиснення	Номінальна швидкість передачі даних, Мбіт/с	Діапазон швидкості передачі даних, Мбіт/с
1	2	3	4	5	6	7	8
MISM-L2.2H	640 – 720	480 – 576	8	24 – 30	110:1	1500	1024 – 1500
MISM-L2.1H	320 – 352	480 – 576	8	24 – 30	165:1	1000	768 – 1024
MISM-L2.2M	320 – 352	480 – 576	8	24 – 30	110:1	1500	1024 – 1500
MISM-L2.0M	320 – 352	240 – 288	8	24 – 30	165:1	1000	768 – 1024
MISM-L1.3H	320 – 352	240 – 288	8	24 – 30	430:1	512	384
MISM-L1.2H	320 – 352	240 – 288	8	12 – 15	650:1	256	192 – 384
MISM-L1.1H	320 – 352	240 – 288	8	6 – 7	1300:	128	56 – 192
MISM-L1.0H	160 – 176	120 – 144	8	12 – 15	5200:1	32	< 56
MISM-L0	720 – 1920	480 – 1080	8, 10, 12	1 – 2	10:1	256	56 – 512

3.3 Стандарти передачі даних

Документ AEDP-8 описує вимоги до форматів зображень і каналів передавання даних, а також пов'язані з МІ метадані, що супроводжують будь-який інформаційний потік із борту БПЛА. Однак власне формат передавання потоків даних з борту БПЛА регламентовано в стандарті STANAG 7023 і керівництві AEDP-9. Без цих нормативних документів неможливо суворо оцінити фактичні вимоги до пропускної спроможності каналів зв'язку з БПЛА, оскільки передача власне зображень повинна супроводжуватися обов'язковою службовою інформацією, що відволікає на себе частину транспортного ресурсу радіолінії.

Стандарт STANAG 7023 визначає два класи даних: сенсорні та допоміжні. Сенсорні дані надходять від сенсорів, що формують відеозображення (радарі із синтезованою апертурою, інфрачервоні та телевізійні фотокамери тощо).

Стандарт передбачає передачу цифрової інформації щонайбільше з 64 бортових сенсорів, що формують зображення. Ці відеопотоки супроводжуються допоміжними даними, в яких міститься інформація про формат відеоданих, алгоритми їх обробки тощо. Крім того, можуть передаватися дані, що формуються іншими бортовими датчиками - навігаційним обладнанням, бортовими системами управління, включно із системою управління відеосенсорами, навігаційно-пілотажним комплексом тощо. Загалом на борту може бути 256 різних джерел даних.

Усі дані (сенсорні та допоміжні) передаються у вигляді окремих файлів. Кожен файл має свій унікальний заголовок, що містить адресу джерела (1 байт, 256 різних адрес) і адресу одержувача (4 байти). Ці 5 байт, по суті, визначають 240 різних типів файлів. У разі сенсорних даних формат файлів визначається у пов'язаних із ними файлах допоміжних даних.

Усі дані передаються по радіолінії пакетами (рис.3.1). Пакет містить синхронізуючу послідовність (10 байт), заголовок (32 байти) і власне файл даних (до 4 Гбайт). Пакет захищається контрольною сумою CRC - обов'язково для заголовка і опціонально для файлу даних. Заголовок визначає довжину файлу даних, адресу джерела та адресу одержувача, а також низку додаткових параметрів, як-от наявність CRC файлу даних. Адреса джерела однозначно вказує на тип даних - дані про місію, дані про ціль, телеметрія платформи, параметри сенсорів, дані від сенсорів тощо. Якщо приймач не зміг отримати або правильно декодувати пакет, його може бути відправлено повторно, з тим самим заголовком.



Рисунок 3.1 – Структура пакету даних

Пакети об'єднуються в сегменти (рис. 3.2), а ті, своєю чергою, - у так звані записи (Records). В окремих сегментах пакети йдуть безпосередньо один за одним, без будь-яких роздільників. Самі сегменти, крім пакетів даних, можуть містити преамбули, постамбули і маркери кінця сегментів. Окремий сегмент, як правило, пов'язаний з активністю окремих груп сенсорів під час місії. Зазвичай протягом сегмента активний щонайменше один сенсор.

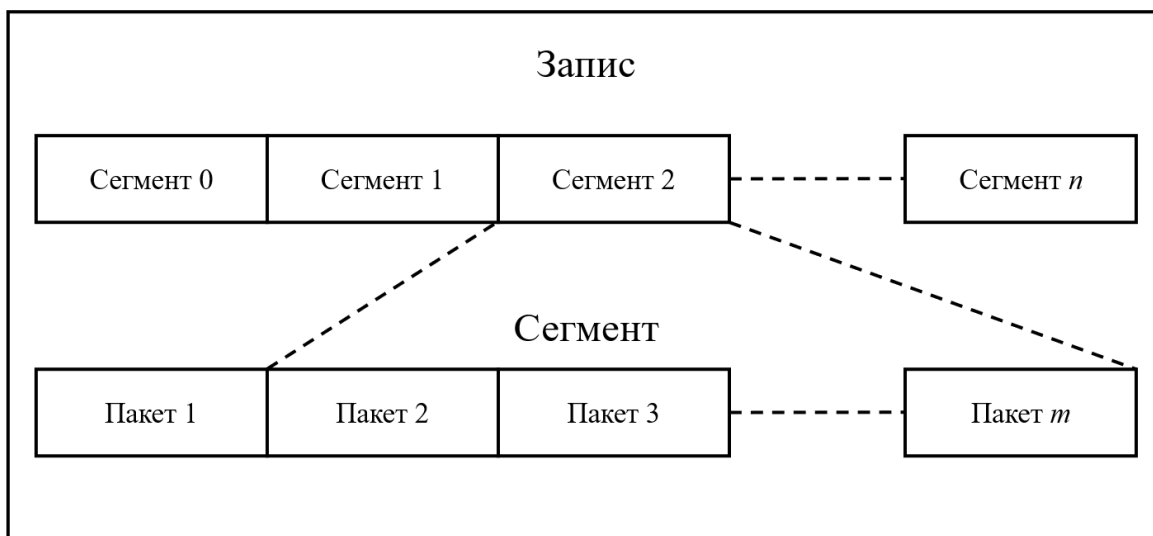


Рисунок 3.2 – Логічна структура каналу

Послідовність сегментів утворює запис. У термінології стандарту STANAG 7023 запис – це послідовність сегментів по ходу виконання місії. У принципі, стандарт допускає наявність декількох записів (тобто кілька незалежних потоків даних), але в існуючій на сьогодні четвертій редакції описується тільки робота з одним записом. Структура запису включає преамбулу і набір сегментів, розділених кінцевими маркерами (постамбулами) (рис. 3.3). Запис завершується маркером кінця запису. Початковий, нульовий сегмент запису – завжди преамбула.



Рисунок 3.3 – Структура даних

Преамбула – це набір допоміжних даних, що передують першому інформаційному сегменту і дають змогу наземній станції опрацювати наступний потік інформаційних пакетів. Наприклад, у преамбулі може міститися інформація про мету, деталі місії, режим роботи сенсорів (тип, формат, спосіб кодування тощо). Як правило, преамбула передує початку виконання завдання (місії).

Постамбула – це набір допоміжних файлів після сегмента даних. Він може містити повторення преамбули, індексовані файли з даними – інтервали роботи сенсорів, таблиці подій, навігаційна інформація тощо. Дані постамбули мають бути достатніми для визначення положення і типу цілей, режимів роботи сенсорів тощо у зв'язці з попереднім потоком відеоданих (сенсорних даних). Наявність постамбули в сегменті не обов'язкова.

Загалом аналіз структури пакетів даних, що використовуються в радіолініях НАТО для зв'язку з БПЛА, дає змогу зробити висновок, що під час покадрового передавання зображень високої або підвищеної чіткості наявність допоміжних метаданих мізерно мало впливає на вимоги до пропускної спроможності радіолінії. Розміщення ж на борту БПЛА накопичувачів інформації ємністю понад 4 Гбайт дає змогу максимально використати ресурси стандартного формату запису для мінімізації і без того малих витрат на передачу службової інформації. При цьому, однак, слід шукати компроміс між числом і тривалістю сегментів у записах, а також необхідністю знижувати ймовірність спотворення інформації в процесі передавання завдяки впливу активних перешкод. Цілком очевидно, що залежно від завадової обстановки, що

складається, параметри структурних елементів запису можуть адаптивно змінюватися.

Стандарт STANAG 7023, як особливо зазначено в цьому документі, сам по собі не є телекомунікаційним протоколом. Він використовується у зв'язці з іншими стандартами НАТО, що описують формати і протоколи передачі даних.

Серед відкритих стандартів НАТО, що регламентують передачу даних з безпілотних авіаційних платформ, зазначимо стандарт STANAG 4607/ AEDP-7. У ньому визначено зміст і формат даних, одержуваних із радарів виявлення рухомих цілей на тлі земної поверхні (GMTI – Ground Moving Target Indicator). Залежно від пропускної спроможності каналів зв'язку описаний у стандарті формат GMTI дає змогу передати тільки інформацію про рухомі цілі або ще й супутні радіолокаційні зображення з високою роздільною здатністю (рис. 3.4). Дані транслюються пакетами розміром 65535 байт, що дає змогу передати інформацію про 80 відміток цілей та їхні траєкторії, супроводжувані з високою роздільною здатністю за дальністю, або про 4300 цілей та їхні траси, супроводжувані у звичайному режимі.

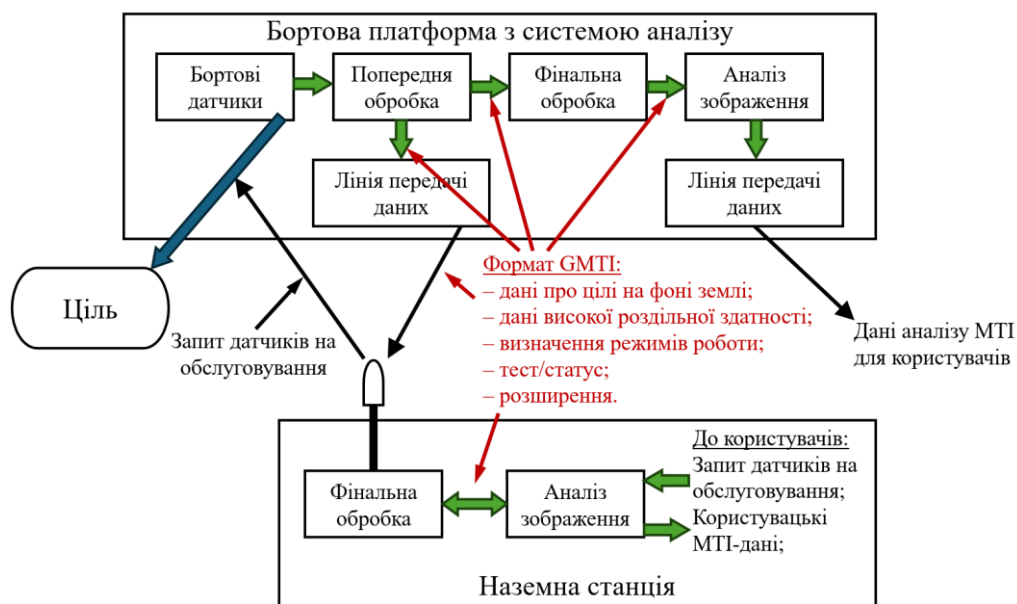


Рисунок 3.4 – Можливі варіанти передавання даних про цілі, що рухаються на тлі земної поверхні

Вимоги до радіоліній зв'язку з БПЛА, сумісних із тактичними засобами Common Data Link (CDL)/Tactical Common Data Link (TCDL), викладено в закритому стандарті НАТО STANAG 7085. Інший стандарт, STANAG 4660, регламентує всі аспекти високозахищеного каналу обміну даними для БПЛА IC2 DL (Interoperable Command and Control Data Link). Цей канал описує передачу на землю (downlink) оперативних даних (телеметрії), а на борт (uplink) – команд управління платформою та обладнанням. У документі характеризуються частоти, ширина смуги сигналів, відстань між пунктами приймання-передавання інформації, швидкість передавання та низка інших специфічних параметрів. Проект стандарту перебуває на стадії завершення, проте в ньому залишилися незгоджені позиції, які потребують доопрацювання. Більшість із них пов'язані з проблемою доступності частотного ресурсу. Ситуацію ускладнює очікуване в найближчі роки впровадження великої кількості нових типів БПЛА, обладнаних датчиками з високою роздільною здатністю. У результаті зростуть вимоги до ширини смуги частот і швидкості передачі даних.

Ключовим документом для країн Альянсу в забезпеченні сумісності БПЛА і наземних пунктів управління (Ground Control Station) став стандарт STANAG 4586. Він ухвалений уже в другій редакції і формулює вимоги до форматів даних і до протоколів обміну, визначаючи один із п'яти можливих рівнів сумісності літального апарата і пункту управління. Величезний позитивний ефект від впровадження цього стандарту – відсутність необхідності розробляти окремі пункти управління для кожного типу БПЛА. Завдання вирішується, зокрема, введенням у комплект апаратури наземної станції спеціального модуля підтримки конкретного типу літального апарата (VSM – Vehicle Specific Module) (рис. 3.5). Забезпечення сумісності також позитивно вплинуло на підвищення конкуренції у сфері STANAG-сумісного обладнання та на зниження витрат на розробку.

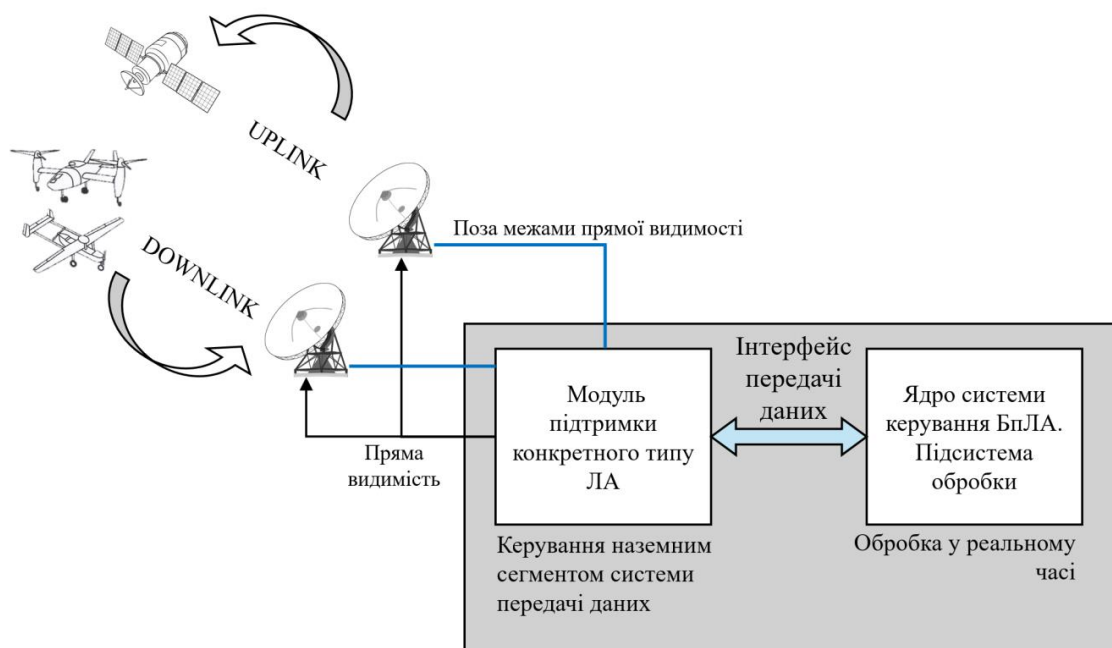


Рисунок 3.5 – Базова архітектура STANAG 4586. Приклад використання супутникового каналу для зв'язку з БПЛА

Що стосується методів радіозв'язку з БПЛА, то в разі застосування тактичних БПЛА, радіус дії яких становить десятки кілометрів, найкращим вибором, згідно з концепціями зарубіжних фахівців, є зв'язок за принципом прямих (радіорелейних) ліній зв'язку в діапазоні дециметрових хвиль. При цьому на центрі управління БПЛА слід використовувати середньоспрямовані антени, орієнтовані в напрямку БПЛА. Для організації зв'язку з БПЛА на стратегічному рівні за відсутності прямої видимості доцільно застосовувати супутникові лінії зв'язку, наприклад, за схемою на рисунку 3.5. Як варіант, можлива організація каналу зв'язку на основі ретрансляторів на БПЛА, а також іоносферного поширення радіохвиль. Однак тут імовірні труднощі з вибором антенних пристроїв у діапазоні декаметрових хвиль для розміщення на БПЛА. Проте такий варіант не слід виключати, оскільки, як відомо, дальність іоносферного зв'язку сягає сотень кілометрів[9].

4 РОЗРАХУНОК ПІДСИЛЮВАЧА ВІДЕОСИГНАЛУ

Для розрахунку підсилювача були обрані наступні характеристики:

- коефіцієнт підсилення за напругою $K_0 = 110$;
- тривалість імпульсу $t = 0,02$ мкс;
- відносний скол вершини імпульсу $< 0,3\%$;
- відносна тривалість фронту $< 0,1$;
- опір навантаження підсилювача $R_H = 0,2$ кОм;
- ємність навантаження підсилювача $C_H = 10$ пФ.

4.1 Розрахунок смуги пропускання

Час фронту t_ϕ і верхня гранична частота f_B аперіодичного підсилювача пов'язані між собою співвідношенням $t_\phi = 0,35/f_B$:

$$f_B = \frac{0,35}{0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-8}} = 1,75 \cdot 10^8 \text{ Гц.}$$

А нижня гранична частота f_H пов'язана зі сколом Δ виразом

$$f_H = -\frac{\ln(1-\Delta)}{2\pi \cdot t_i}, \text{ звідси отримаємо:}$$

$$f_H = -\frac{\ln(1-0,003)}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-8}} = 2,391 \cdot 10^4 \text{ Гц.}$$

З отриманого значення граничної частоти видно, що для каскаду необхідно використовувати високочастотний транзистор, тому для цих розрахунків було обрано КТ399А, інші важливі параметри представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри КТ399А

H_{21e}	$U_{ке}$	$I_{к}, \text{мА}$	$I_{к0}, \text{мкА}$	$f_T(f), \text{МГц}$	$C_{к}, \text{пф}$	$U_{ке}$	$\tau_{к}, \text{пс}$
40	1	5	0,5	2600	1,03	5	4

4.2 Розрахунок кількості каскадів

Опір розтікання бази $r_{\bar{o}}$ при технологічному параметрі $\xi = 5$:

$$r_{\bar{o}} = \frac{\xi \cdot \tau_{к}}{C_{к}}; \quad (4.1)$$

$$r_{\bar{o}} = \frac{5 \cdot 4 \cdot 10^{-12}}{1,03 \cdot 10^{-12}} = 19,417 \text{ Ом.}$$

Тепер можна обчислити високочастотний параметр μ :

$$\mu = \sqrt{2\pi f_T r_{\bar{o}} C_{к}};$$

$$\mu = \sqrt{2\pi \cdot 2,6 \cdot 10^9 \cdot 19,417 \cdot 1,03 \cdot 10^{-12}} = 0,572.$$

Максимальна площа підсилення диференційного каскаду за рівнянням 4.3:

$$\Pi_{im} \cong \frac{f_T}{(1 + \mu)^2}; \quad (4.3)$$

$$\Pi_{im} \cong \frac{2,6 \cdot 10^9}{(1 + 0,572)^2} = 1,053 \cdot 10^9.$$

Функція $\varphi(N)$ враховує зменшення f_{BN} з ростом числа каскадів. У даному випадку, $N = 5$.

$$\varphi(5) = \sqrt{\sqrt{5}\sqrt{2} - 1} = 0,386.$$

Визначив орієнтовне число каскадів підсилювача за рівнянням 4.4, при $k = 1,5$ для випадку з високочастотною корекцією:

$$N \geq \frac{\lg(1,5 \cdot K_{0N})}{\lg\left(\frac{k \cdot \Pi_{im} \cdot \varphi(N)}{f_{BN}}\right)}; \quad (4.4)$$

$$N \geq \frac{\lg(1,5 \cdot 110)}{\lg\left(\frac{1,5 \cdot 1,053 \cdot 10^9 \cdot 0,386}{1,75 \cdot 10^8}\right)} = 4,095.$$

Тоді, верхня частота кожного каскаду становить:

$$f_{Bi} = \frac{f_{BN}}{\varphi(N)}; \quad (4.5)$$

$$f_{Bi} = \frac{1,75 \cdot 10^8}{0,386} = 4,538 \cdot 10^8 \text{ Гц},$$

а нижнього:

$$f_{Hi} = F_{HN} \cdot \varphi(N); \quad (4.6)$$

$$f_{Hi} = 2,391 \cdot 10^4 \cdot 0,386 = 9,22 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

Коефіцієнт підсилення кожного каскаду і необхідна площа посилення знаходяться за рівняннями 4.7 – 4.8:

$$\Pi_i = K_{0i} \cdot f_{Bi}; \quad (4.7)$$

$$K_{0N} = (K_{0i})^N = \left(\frac{\Pi_i \cdot \varphi(N)}{f_{BN}} \right)^N; \quad (4.8)$$

$$K_{0i} = \sqrt[5]{1,5 \cdot 110} = 2,776,$$

$$\Pi_i = 2,776 \cdot 4,538 \cdot 10^9 = 1,26 \cdot 10^9.$$

4.3 Розрахунок кінцевого підсилювального каскаду

Початкові дані:

- коефіцієнт підсилення $K_0 = 2,776$;
- верхня та нижня граничні частоти
- рівень лінійних спотворень на частотах
- опір навантаження.

Повторно перевірів обраний транзистор на придатність реалізувати потрібний коефіцієнт посилення і смугу пропускання при заданих частотних спотвореннях, за рівнянням 4.9:

$$a_B = \sqrt{\left(\frac{1}{M_B} \right)^2 - 1}; \quad (4.9)$$

$$a_B = \sqrt{\left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{2}}} \right)^2 - 1} = 1.$$

За рівнянням 4.10 визначив диференціальний опір емітерного переходу r_e , при умові, що струм емітера і струм колектора однакові:

$$r_e = \frac{25,6 \cdot 10^{-3}}{I_e}; \quad (4.10)$$

$$r_e = \frac{25,6 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 5,12 \text{ Ом.}$$

Диференціальний опір емітерного переходу $r_{\bar{b}e}$ знаходиться за допомогою рівняння 4.11:

$$r_{\bar{b}e} = (1 + h_{21e}) \cdot r_e; \quad (4.11)$$

$$r_{\bar{b}e} = (1 + 40) \cdot 5,12 = 209,92 \text{ Ом.}$$

Ємність емітерного переходу C_e отримав за допомогою рівняння 4.12:

$$C_e = \frac{1}{2\pi \cdot f_T \cdot r_e}; \quad (4.12)$$

$$C_e = \frac{1}{2\pi \cdot 2,6 \cdot 10^9 \cdot 5,12} = 1,196 \cdot 10^{-11} \text{ Ф.}$$

Власна постійна часу транзистора τ (4.13):

$$\tau = C_e \cdot \frac{r_{\bar{o}} \cdot r_{\bar{b}e}}{r_{\bar{o}} + r_{\bar{b}e}}; \quad (4.13)$$

$$\tau = 1,196 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{19,417 \cdot 209,92}{19,417 + 209,92} = 2,125 \cdot 10^{-10} \text{ с;}$$

$$q = \frac{1}{2\pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 2,125 \cdot 10^{-10}} = 1,65;$$

$$K_0 < \frac{(1,65 - 1) \cdot 2,125 \cdot 10^{-10}}{1,03 \cdot 10^{12} \cdot 19,417} = 6,91.$$

Визначення параметрів транзистора g_{11} , C_{11} , g_{12} , C_{12} , $|Y_{21}| = S$, $g_{22} = g_i$ та C_{22} проводиться на середній частоті підсилення, хоча більш точніші результати отримуються на верхній частоті $f = 1,75 \cdot 10^8$ Гц.

4.4 Розрахунок Y-параметрів

Вхідний опір у схемі загальною базагою на низькій частоті:

$$h_{11\bar{o}} = r_e + \frac{r_{\bar{o}}}{h_{21e}}; \quad (4.14)$$

$$h_{11\bar{o}} = 5,12 + \frac{19,417}{40} = 5,605 \text{ Ом.}$$

Гранична частота по крутизні знаходиться за допомогою рівнянь 4.14 – 4.17:

$$f_s = \frac{f_T \cdot h_{11\bar{o}}}{r_{\bar{o}}}; \quad (4.14)$$

$$\gamma_T = \frac{f}{f_T}; \quad (4.15)$$

$$\gamma_S = \frac{f}{f_s}. \quad (4.16)$$

$$f_s = \frac{2,6 \cdot 10^9 \cdot 5,605}{19,417} = 7,506 \cdot 10^8 \text{ (Гц)},$$

$$\gamma_T = \frac{1,75 \cdot 10^8}{2,6 \cdot 10^9} = 0,067;$$

$$\gamma_S = \frac{1,75 \cdot 10^8}{7,506 \cdot 10^8} = 0,233.$$

Власне Y-параметри розраховуються наступним чином:

$$Y_{11} = g_{11} + j \cdot b_{11};$$

$$g_{11} = \frac{1 + h_{21e} \cdot \gamma_T \cdot \gamma_S}{h_{21e} \cdot h_{11\bar{o}} \cdot (1 + \gamma_S^2)}; \quad (4.17)$$

$$b_{11} = \frac{h_{21e} \cdot \gamma_T - \gamma_S}{h_{21e} \cdot h_{11\bar{o}} \cdot (1 + \gamma_S^2)} = \omega \cdot C_{11}.$$

$$\begin{aligned}
Y_{12} &= g_{12} + j \cdot b_{12}; \\
g_{12} &= -\frac{\omega \cdot \tau_{\kappa} \cdot (h_{21e} \cdot \gamma_T - \gamma_S)}{h_{21e} \cdot h_{11\delta} \cdot (1 + \gamma_S^2)}; \\
b_{12} &= -\omega \cdot C_{\kappa} + \frac{\omega \cdot \tau_{\kappa} \cdot (1 + h_{21e} \cdot \gamma_T \cdot \gamma_S)}{h_{21e} \cdot h_{11\delta} \cdot (1 + \gamma_S^2)} = \omega \cdot C_{12}.
\end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
Y_{21} &= g_{21} + j \cdot b_{21}; \\
g_{21} &= \frac{h_{21e}}{(1 + h_{21e}) \cdot h_{11\delta} \cdot (1 + \gamma_S^2)}; \\
b_{21} &= -\frac{h_{21e} \cdot \gamma_S}{(1 + h_{21e}) \cdot h_{11\delta} \cdot (1 + \gamma_S^2)} = \omega \cdot C_{21}.
\end{aligned} \tag{4.19}$$

$$\begin{aligned}
Y_{22} &= g_{22} + j \cdot b_{22}; \\
g_{22} &= \frac{\omega \cdot \tau_{\kappa} \cdot \gamma_S}{h_{11\delta} \cdot (1 + \gamma_S^2)}; \\
b_{22} &= \omega \cdot C_{\kappa} + \frac{\omega \cdot \tau_{\kappa}}{h_{11\delta} \cdot (1 + \gamma_S^2)} = \omega \cdot C_{22}.
\end{aligned} \tag{4.20}$$

$$g_{11} = \frac{1 + 40 \cdot 0,067 \cdot 0,233}{40 \cdot 5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = 6,885 \cdot 10^{-3} \text{ CM};$$

$$b_{11} = \frac{1 + 40 \cdot 0,067 - 0,233}{40 \cdot 5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = 1,04 \cdot 10^{-2} \text{ CM};$$

$$C_{11} = \frac{1,04 \cdot 10^{-2}}{2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8} = 9,46 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$g_{12} = -\frac{2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^{-12} \cdot (40 \cdot 0,067 - 0,233)}{40 \cdot 5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = -4,575 \cdot 10^{-5} \text{ CM};$$

$$b_{12} = -2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8 \cdot 1,03 \cdot 10^{-12} + \\ + \frac{2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^{-12} \cdot (40 \cdot 0,067 \cdot 0,233)}{40 \cdot 5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = -1,133 \cdot 10^{-3} \text{ CM};$$

$$C_{12} = \frac{-1,133 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8} = -1,03 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$g_{21} = \frac{40}{(1 + 40) \cdot 5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = 1,651 \cdot 10^{-1} \text{ CM};$$

$$b_{21} = -\frac{40 \cdot 0,233}{(1 + 40) \cdot 5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = -3,849 \cdot 10^{-2} \text{ CM};$$

$$|Y_{21}| = S = \sqrt{(1,651 \cdot 10^{-1})^2 + (-3,849 \cdot 10^{-2})^2} = 1,695 \cdot 10^{-1} \text{ A/B}.$$

Причому $S = \frac{S_0}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau}$, тоді $S_0 = S \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)^2}$:

$$S_0 = 1,695 \cdot 10^{-1} \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot 1,75 \cdot 10^8 \cdot 2,125 \cdot 10^{-10})^2} = 1,741 \cdot 10^{-1} \text{ A/B}.$$

$$g_{22} = g_i = \frac{2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^{-12} \cdot 0,233}{5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = 1,735 \cdot 10^{-4} \text{ CM};$$

$$b_{22} = 2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8 \cdot 1,03 \cdot 10^{-12} + \frac{2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8 \cdot 4 \cdot 10^{-12}}{5,605 \cdot (1 + 0,233^2)} = 1,877 \cdot 10^{-3} \text{ CM};$$

$$C_{22} = C_{\text{вух}} = \frac{1,877 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 1,75 \cdot 10^8} = 1,707 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Оцінив навантажувальну колекторну провідність для забезпечення заданого посилення і смуги пропускання, використовуючи рівняння 4.21:

$$\begin{aligned}
 g'_k &= \frac{S}{K_0} - g_i - g_H; \\
 g''_k &= \frac{S \cdot C_k \cdot r'_o \cdot \omega_B}{a_B - \omega_B \cdot \tau} - g_i - g_H; \\
 g''_k &\leq g_k \leq g'_k.
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

$$\begin{aligned}
 g'_k &= \frac{1,695 \cdot 10^{-1}}{2,776} - 1,735 \cdot 10^{-4} - 0,005 = 5,587 \cdot 10^{-5} \text{ См}; \\
 g''_k &= \frac{1,695 \cdot 10^{-1} \cdot 1,03 \cdot 10^{-12} \cdot 19,417 \cdot 2\pi \cdot 4,538 \cdot 10^8}{1 - 2\pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 2,125 \cdot 10^{-10}} - \\
 &\quad - 1,735 \cdot 10^{-4} - 0,005 = 1,936 \cdot 10^{-2} \text{ См}; \\
 1,936 \cdot 10^{-2} &\leq g_k \leq 5,587 \cdot 10^{-2}; \\
 51,665 &\geq R_k \geq 17,897.
 \end{aligned}$$

Вхідна провідність і ємність підсилювального каскаду знаходяться з використанням рівняння 4.22:

$$\begin{aligned}
 g_{ex} &= g_{11} + g_{12} \cdot K_0; \\
 C_{ex} &= \frac{\tau}{r'_o} + C_k \cdot K_0.
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

$$\begin{aligned}
 g_{ex} &= 6,885 \cdot 10^{-3} - 4,575 \cdot 10^{-5} \cdot 2,776 = 6,758 \cdot 10^{-3} \text{ См}; \\
 C_{ex} &= \frac{2,125 \cdot 10^{-10}}{19,417} + 1,03 \cdot 10^{-12} \cdot 2,776 = 1,38 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.
 \end{aligned}$$

4.5 Розрахунок високочастотної емітерної корекції

Визначив еквівалентну ємність $C_{екв}$, нехай монтажна ємність дорівнює $C_M = 1$ пФ:

$$C_{екв} = 10^{-11} + 1,707 \cdot 10^{-12} + 10^{-12} = 1,271 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}.$$

Розрахував необхідне значення глибини негативного зворотного зв'язку з використанням рівняння 4.23:

$$F = \frac{\omega_B \cdot S_0 \cdot \tau}{S_0 - \omega_B \cdot C_{екв} \cdot K_0} \quad (4.23)$$

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 1,741 \cdot 10^{-1} \cdot 2,125 \cdot 10^{-10}}{1,741 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot \pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 1,271 \cdot 10^{-11} \cdot 2,776} = 1,436.$$

Знайшов необхідне значення колекторного опору за рівнянням 4.24:

$$R_{\kappa} = \frac{K_0 \cdot F \cdot R_n}{S_0 \cdot R_n - K_0 \cdot F} \quad (4.24)$$

$$R_{\kappa} = \frac{2,776 \cdot 1,436 \cdot 200}{1,741 \cdot 10^{-1} \cdot 200 - 2,776 \cdot 1,436} = 25,86 \text{ Ом.}$$

Розрахував елементи кола корекції (4.25) – (4.26):

$$R_{ек} = \frac{F - 1}{S_0}; \quad (4.25)$$

$$C_{ек} = \frac{F}{\omega_B \cdot R_{ек}}. \quad (4.26)$$

$$R_{ек} = \frac{1,436 - 1}{1,741 \cdot 10^{-1}} = 2,503 \text{ Ом;}$$

$$C_{ек} = \frac{1,436}{2 \cdot \pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 2,503} = 2,012 \cdot 10^{-10} \text{ Ф.}$$

Розділову ємність C_p визначив за заданими спотвореннями M_n на нижній граничній частоті (4.27):

$$C_p \geq \frac{g_n \cdot (g_i + g_{\kappa})}{a_n \cdot \omega_n \cdot (g_i + g_{\kappa} + g_n)}. \quad (4.27)$$

$$C_p \geq \frac{0,005 \cdot \left(1,735 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{25,86}\right)}{1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 9,22 \cdot 10^3 \cdot \left(1,735 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{25,86} + 0,005\right)} = 7,647 \cdot 10^{-8} \text{ Ф.}$$

Тепер необхідно обчислити низькочастотну корекцію RC-колом. Відповідно до рівняння 4.28 визначив постійну часу τ_n каскаду без корекції:

$$\begin{aligned} \tau_n &= C_p \cdot (R_k + R_n); \\ \tau_n &= 7,647 \cdot 10^{-8} \cdot (25,86 + 200) = 1,727 \cdot 10^{-5} \text{ с.} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Знайшов необхідні для здійснення корекції значення R_ϕ і C_ϕ (5.5) - (5.6), за ω_n дещо меншого від заданого, нехай $\omega_n = 2\pi \cdot 9 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$:

$$\begin{aligned} R_\phi &= R_k \cdot \left(\frac{1}{\tau_n \cdot \omega_n} - 1\right); \\ C_\phi &= \frac{\tau_n \cdot R_n \cdot (R_k + R_\phi)}{(R_k + R_n) \cdot R_\phi \cdot R_k}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$R_\phi = 25,86 \cdot \left(\frac{1}{1,727 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^3} - 1\right) = 0,618 \text{ Ом};$$

$$C_\phi = \frac{1,727 \cdot 10^{-5} \cdot 200 \cdot (25,86 + 0,618)}{(25,86 + 200) \cdot 0,618 \cdot 25,86} = 2,535 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

4.6 Стабілізація режиму роботи підсилюючого каскаду

Початкові дані:

- середня температура $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- коефіцієнт $a = 0,06$;
- верхня межа заданого температурного діапазону $T_{\max} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$;
- верхня межа заданого температурного діапазону $T_{\min} = -45 \text{ }^\circ\text{C}$;

– коефіцієнт температурного зсуву вихідних характеристик $a_T = 2.5 \cdot 10^{-3}$ В/град.

$$\Delta T_1 = 85 - 25 = 60 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta T = 85 - (-45) = 130 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Розрахував параметри $\Delta I_{к\bar{0}}$ та $\Delta U_{\bar{0}T}$ за рівнянням 4.30:

$$\begin{aligned} \Delta I_{к\bar{0}} &= I_{0к\bar{0}} \cdot (e^{a \cdot \Delta T_1} - 1) \\ \Delta U_{\bar{0}T} &= \alpha_T \cdot \Delta T \\ \Delta I_{к\bar{0}} &= 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot (e^{0,06 \cdot 60} - 1) = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ А}; \\ \Delta U_{\bar{0}T} &= 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 130 = 0,325 \text{ В}. \end{aligned} \tag{4.30}$$

Розрахував мінімальну напругу живлення $U_{жс}^*$:

$$\begin{aligned} U_{жс}^* &= 1,5 \cdot (U_{ке} + I_{к} \cdot R'_{\underline{}}); \\ R'_{\underline{}} &= R_{к} + R_{\phi}. \\ R'_{\underline{}} &= 25,86 + 0,618 = 26,541 \text{ Ом}; \\ U_{жс}^* &= 1,5 \cdot (1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 26,541) = 1,699 \text{ В}. \end{aligned} \tag{4.31}$$

Прийнявши напругу живлення $U_{жс} = 9 \text{ В}$. Можна уточнити значення U_e :

$$\begin{aligned} U_e &= U_{жс} - (U_{ке} + I_{к} \cdot R'_{\underline{}}). \\ U_e &= 9 - (1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 26,541) = 7,868 \text{ В}. \end{aligned} \tag{4.32}$$

Визначив величину емітерного опору R_e :

$$R_e = \frac{U_e}{I_e}. \quad (4.33)$$

$$R_e = \frac{7,868}{5 \cdot 10^{-3}} = 1574 \text{ Ом.}$$

Тоді струм базового дільника I_D :

$$I_D \geq \frac{\Delta I_{кб0}}{\frac{\Delta I_{к}}{I_{к}} - \left(\frac{\Delta I_{кб0}}{I_{к}} + \frac{\Delta U_{бГ}}{U_e} \right)}. \quad (4.34)$$

$$I_D \geq \frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{0,1 - \left(\frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,325}{7,868} \right)} = 3,228 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Оцінюючи I_b як $I_b \cong \frac{5 \cdot 10^{-3}}{40} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$ Для виконання умови

$I_D \geq (3 \dots 5) \cdot I_b$, нехай $I_D = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$

Розрахував опір $R_{б1}$ та $R_{б2}$, прийнявши $U_{бе} = 0,7 \text{ В.}$

$$R_{б2} = \frac{U_e + U_{бе}}{I_D};$$

$$R_{б1} = \frac{U_{жс} - U_e - U_{бе}}{I_D + I_b}.$$

(4.35)

$$R_{б2} = \frac{7,868 + 0,7}{6,25 \cdot 10^{-4}} = 13708 \text{ Ом;}$$

$$R_{б1} = \frac{9 - 7,868 - 0,7}{6,25 \cdot 10^{-4} + 1,25 \cdot 10^{-4}} = 577 \text{ Ом.}$$

Оцінив абсолютну нестабільність струму колектора:

$$\Delta I_{\kappa} \cong \frac{\Delta U_{\delta T}}{R_e} + \Delta I_{\kappa \delta 0} \cdot (1 + g_{\text{ex}} \cdot r'_\delta) \cdot \frac{1 + R_{\delta 1} \cdot R_{\delta 2}}{R_e \cdot (R_{\delta 1} + R_{\delta 2})}. \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{\kappa} &\cong \frac{0,325}{1574} + 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 6,758 \cdot 10^{-3} \cdot 19,417) \times \\ &\times \frac{1 + 577 \cdot 13708}{1574 \cdot (577 + 13708)} = 2,097 \cdot 10^{-4} \text{ А.} \end{aligned}$$

Коефіцієнт нестабільності струму колектора отримується наступним чином:

$$\frac{\Delta I_{\kappa}}{I_{\kappa}} = \frac{2,097 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 4,194 \cdot 10^{-2}.$$

Також необхідно визначити опір R_e^* :

$$R_e^* = 1573,522 - 2,503 = 1571 \text{ Ом.}$$

Ємність C_e становить:

$$\begin{aligned} C_e &\geq \frac{10}{\omega_n \cdot R_e}; \quad (4.37) \\ C_e &\geq \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot 9,22 \cdot 10^3 \cdot 1574} = 1,097 \cdot 10^{-7} \text{ Ф.} \end{aligned}$$

4.7 Розрахунок передкінцевих каскадів

Вихідні дані ті самі, що й для кінцевого каскаду, крім $R_n = \frac{1}{g_{\text{ex}}}$, $R_n = \frac{1}{6,758 \cdot 10^{-3}} = 148 \text{ Ом}$ та $C_n = C_{\text{ex}} = 1,38 \cdot 10^{-11} \text{ Ф.}$

Оскільки модель транзистору не змінюється, то і Y-параметри не змінюються.

Оцінив навантажувальну колекторну провідність для забезпечення заданого посилення і смуги пропускання (4.21):

$$g'_k = \frac{1,695 \cdot 10^{-1}}{2,776} - 1,735 \cdot 10^{-4} - \frac{1}{148} = 5,142 \cdot 10^{-2}$$

$$g''_k = \frac{1,695 \cdot 10^{-1} \cdot 1,03 \cdot 10^{-12} \cdot 19,417 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 4,538 \cdot 10^8}{1 - 2 \cdot \pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 2,125 \cdot 10^{-10}} - 1,735 \cdot 10^{-4} - \frac{1}{148} = 1,76 \cdot 10^{-2}$$

$$1,76 \cdot 10^{-2} \leq g_k \leq 5,142 \cdot 10^{-2}$$

$$56,827 \geq R_k \geq 18,479$$

Вхідна провідність $g_{вх}$ і ємність $C_{вх}$ підсилюючого каскаду залишаються такі самі, як і для кінцевого каскаду.

Тепер необхідно обчислити високочастотну емітерну корекцію. Для цього необхідно визначити еквівалентну ємність $C_{екв}$, нехай монтажна ємність C_m становить 1 пФ.

$$C_{екв} = 1,38 \cdot 10^{-11} + 1,707 \cdot 10^{-12} + 10^{-12} = 1,651 \cdot 10^{-11} \text{ Ф.}$$

Розрахував необхідне значення негативного зворотнього зв'язку (4.23):

$$F = \frac{2\pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 1,741 \cdot 10^{-1} \cdot 2,125 \cdot 10^{-10}}{1,741 \cdot 10^{-1} - 2\pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 1,651 \cdot 10^{-11} \cdot 2,776} = 2,433.$$

Знайшов необхідне значення колекторного опору (4.24):

$$R_k = \frac{2,776 \cdot 2,433 \cdot 148}{1,741 \cdot 10^{-1} \cdot 148 - 2,776 \cdot 2,433} = 52,596 \text{ Ом.}$$

Розрахував елементи кола корекції (4.25 – 4.26) :

$$R_{ек} = \frac{2,433 - 1}{1,741 \cdot 10^{-1}} = 8,231 \text{ Ом};$$

$$C_{ек} = \frac{2,433}{2\pi \cdot 4,538 \cdot 10^8 \cdot 8,231} = 1,037 \cdot 10^{-10} \text{ Ф.}$$

Розділову ємність (4.27) визначив за заданими спотвореннями на нижній граничній частоті:

$$a_n = \sqrt{\left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{2}}}\right)^2} - 1 = 1;$$

$$C_p \geq \frac{\frac{1}{148} \cdot \left(1,735 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{52,596}\right)}{1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 9,22 \cdot 10^3 \cdot \left(1,735 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{52,596} + \frac{1}{148}\right)} = 8,627 \cdot 10^{-8} \text{ Ф.}$$

4.8 Низькочастотна корекція RC-колом

Розраховував мінімальне значення напруги живлення $U_{жс}^*$, для цього, перш за все, необхідно обчислити опір постійному струму в колі колекторного струму за винятком R_e (4.31):

$$R'_e = 52,596 + 1,156 = 53,752 \text{ Ом};$$

$$U_{жс}^* = 1,5 \cdot \left(1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 53,752\right) = 1,903 \text{ В.}$$

Тепер необхідно уточнити значення джерела живлення $U_{жс}$. Нехай, $U_{жс} = 9$ В. Також необхідно уточнити значення U_e (4.32):

$$U_e = 9 - \left(1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 53,752\right) = 7,731 \text{ В.}$$

Визначив величину R_e (4.33):

$$R_e = \frac{7,731}{5 \cdot 10^{-3}} = 1546 \text{ Ом.}$$

Струм діляника бази становить (4.34):

$$I_D \geq \frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{0,1 - \left(\frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,325}{7,731} \right)} = 3,272 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Струм бази I_B становить $1,25 \cdot 10^{-4}$ А, тоді $I_D = I_D \geq (3...5) \cdot I_B = 6,25 \cdot 10^{-4}$ А.

Розрахував опори $R_{\delta 1}$ та $R_{\delta 2}$, прийнявши, що $U_{be} = 0,7$ В (4.35).

$$R_{\delta 2} = \frac{7,731 + 0,7}{6,25 \cdot 10^{-4}} = 13490 \text{ Ом;}$$

$$R_{\delta 1} = \frac{9 - 7,731 - 0,7}{6,25 \cdot 10^{-4} + 1,25 \cdot 10^{-4}} = 758 \text{ Ом.}$$

Оцінив абсолютну нестабільність струму колектора (4.36):

$$\Delta I_K \cong \frac{0,325}{1546} + 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot \left(1 + 6,758 \cdot 10^{-3} \cdot 19,417 \right) \times$$

$$\times \frac{1 + 758 \cdot 13490}{1546 \cdot (758 + 13490)} = 2,136 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Коефіцієнт нестабільності струму колектора становить:

$$\frac{\Delta I_K}{I_K} = \frac{2,136 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 4,272 \cdot 10^{-2}.$$

Визначив опір R_e^* :

$$R_e^* = 1546,248 - 8,231 = 1538 \text{ Ом.}$$

Оцінив ємність C_e (4.37):

$$C_e \geq \frac{10}{2\pi \cdot 9,22 \cdot 10^3 \cdot 1546} = 1,116 \cdot 10^{-7} \text{ Ф.}$$

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено глибоке дослідження, спрямоване на розробку та синтез підсилювача відеосигналу для обробки зображень, отриманих з безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Актуальність теми зумовлена зростанням ролі БПЛА у сучасних технологіях, що охоплюють військові, аграрні, екологічні та інші сфери, де необхідне високоякісне візуальне спостереження. Основною метою роботи було забезпечення високої якості передачі відеосигналу з мінімальними втратами та затримками, що є критично важливим для оперативного прийняття рішень і підвищення ефективності роботи систем керування БПЛА.

На початковому етапі роботи було виконано детальний аналіз сучасних вимог до систем передачі даних з БПЛА. Розглянуто особливості радіокомунікаційних каналів, їх переваги та недоліки у різних умовах експлуатації. Проведено оцінку існуючих стандартів передачі відеосигналів, таких як STANAG 4609, та вимог до них. Значна увага приділялася дослідженню алгоритмів обробки зображень, які включають передові методи глибокого навчання, такі як YOLO, SSD та Faster R-CNN. Ці алгоритми показали свою ефективність у виявленні та ідентифікації об'єктів навіть за складних умов експлуатації, таких як наявність шумів, змінного освітлення та руху об'єктів.

У процесі розробки підсилювача відеосигналу було проведено розрахунки основних параметрів, включаючи смугу пропускання, кількість каскадів підсилення, їх стабілізацію та компенсацію високочастотних спотворень. Окремо досліджено способи мінімізації перешкод і покращення якості сигналу за рахунок використання сучасних матеріалів та технологій. Це дозволило створити підсилювач, який відповідає високим стандартам передачі відеосигналу та забезпечує його надійність навіть за умов впливу зовнішніх перешкод і змін у навколишньому середовищі.

Результати роботи підтвердили ефективність розробленого підсилювача для передачі відеосигналу з БПЛА. Висока якість сигналу, забезпечена новим пристроєм, дозволяє вирішувати широкий спектр завдань, включаючи моніторинг, спостереження, пошук і рятування, картографування територій, охорону об'єктів і багато іншого. Пристрій має високу адаптивність до різних умов експлуатації та забезпечує стабільність сигналу на значних відстанях.

Таким чином, виконана робота не лише вирішує завдання оптимізації систем передачі даних з БПЛА, але й робить вагомий внесок у розвиток технологій безпілотної авіації. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень у галузі, сприяючи впровадженню інноваційних рішень у сфері, де БПЛА можуть суттєво підвищити ефективність і якість виконання завдань.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Sklyar, B. Cifrovaja svjaz': teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie. 2-e izd. [Digital Communication: Theoretical Foundations and Practical Applications. 2nd ed.], Publishing house "Williams", 2009. 1104.
2. Valavanis, K.P.; Vachtsevanos, G.J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2015; pp. 1–3022.
3. Cazzato, D.; Cimarelli, C.; Sanchez-Lopez, J.L.; Voos, H.; Leo, M. A survey of computer vision methods for 2d object detection from unmanned aerial vehicles. *J. Imaging* 2020, 6, 78.
4. Wu, X.; Li, W.; Hong, D.; Tao, R.; Du, Q. Deep Learning for Unmanned Aerial Vehicle-Based Object Detection and Tracking: A survey. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 2022, 10, 91–124.
5. Storch, M.; De Lange, N.; Jarmer, T.; Waske, B. Detecting Historical Terrain Anomalies with UAV-LiDAR Data Using Spline-Approximation and Support Vector Machines. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2023, 16, 3158–3173.
6. Wu, S.; Wang, L.; Zeng, X.; Wang, F.; Liang, Z.; Ye, H. UAV-Mounted GPR for Object Detection Based on Cross-Correlation Background Subtraction Method. *Remote Sens.* 2022, 14, 5132.]
7. Gade, R.; Moeslund, T.B. Thermal cameras and applications: A survey. *Mach. Vis. Appl.* 2014, 25, 245–262.
8. Mehmood, K.; Ali, A.; Jalil, A.; Khan, B.; Cheema, K.M.; Murad, M.; Milyani, A.H. Efficient online object tracking scheme for challenging scenarios. *Sensors* 2021, 21, 8481.
9. Akshatha, K.R.; Karunakar, A.K.; Shenoy, S.; Dhareshwar, C.V.; Johnson, D.G. Manipal-UAV person detection dataset: A step towards benchmarking dataset and algorithms for small object detection. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2023, 195, 77–89.