

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи моніторингу вузлів комп'ютерної мережі  
на базі рою БПЛА

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПм-22-2  
Погореленко В.В.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Системне програмування  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Ткачов В.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ комп'ютерної інженерії та управління \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ електронних обчислювальних машин \_\_\_\_\_

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

Спеціальність \_\_\_\_\_ 123 «Комп'ютерна інженерія» \_\_\_\_\_  
(код і повна назва)

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

Освітня програма \_\_\_\_\_ Системне програмування \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студенту \_\_\_\_\_ Погореленку Володимирі Володимировичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Методи моніторингу вузлів комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від “ 06 ” листопада 2023 р. № 1299 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 15 січня 2024 р. \_\_\_\_\_

3. Вхідні дані до роботи \_\_\_\_\_ Персональний комп'ютер – 2 шт.; \_\_\_\_\_

Безпроводний маршрутизатор TP-LINK Archer AX11000 - 2 шт.; \_\_\_\_\_

БПЛА Mavic – 10 шт.; \_\_\_\_\_

Плата Arduino – 1 шт.; \_\_\_\_\_

Антенa Avenger 2.4G/5.8G – 4 шт.; \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

1. Вступ \_\_\_\_\_

2. Теоретичні основи моніторингу комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА \_\_\_\_\_

3. Аналіз методів моніторингу комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА \_\_\_\_\_

4. Теоретичне моделювання та оптимізація обраного методу \_\_\_\_\_

5. Важливість оптимізації алгоритмів управління роєм БПЛА для  
ефективного моніторингу мережі \_\_\_\_\_

6. Висновки \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 13 слайдів у форматі pptx.

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

| Найменування розділу | Консультант<br>(посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу |      |
|----------------------|--|---|------|
|                      |  | підпис                                      | дата |
|                      |  |   |      |
|                      |  |   |      |

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи                              | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|--|--------------------------------|----------|
| 1 | Опрацювання літератури за темою роботи           | 06.11 – 15.11                  |          |
| 2 | Дослідження предметної області                   | 16.11 – 21.11                  |          |
| 3 | Огляд аналогічних рішень                         | 22.11 – 29.11                  |          |
| 4 | Формулювання задачі і розгляд методів її рішення | 30.11 – 1.12                   |          |
| 5 | Розробка методу                                  | 02.12 – 10.12                  |          |
| 6 | Модельний експеримент                            | 11.12 – 30.12                  |          |
| 7 | Оформлення пояснювальної записки                 | 31.12 – 12.01                  |          |
|   |  |                                |          |
|   |  |                                |          |
|   |  |                                |          |

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доц. Ткачов В.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 106 с., 12 рис., 2 табл., 2 дод., 12 джерел.

БПЛА, ПЕРЕДАЧА ДАНИХ, СУПУТНИКОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, ПРЯМИЙ РАДІОЗВ'ЯЗОК, МІМО, СИГНАЛ, МЕТОД, СИСТЕМА, МОДЕЛЬ, МЕРЕЖА, ВУЗЛИ, МОНІТОРИНГ, МЕШ, АЛГОРИТМ.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та розробка методів моніторингу вузлів комп'ютерної мережі на основі використання рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з метою підвищення ефективності, пропускної спроможності та надійності зв'язку.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розглянуто теоретичні основи і поняття моніторингу вузлів комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА, було проаналізовано методи моніторингу комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА, було проведено теоретичне моделювання та оптимізовано обраний метод та було розглянуто значення оптимізації алгоритмів управління роєм БПЛА для ефективного моніторингу мережі.

## ABSTRACT

Master's thesis: 106 pages, 12 figures, 2 tables, 2 appendices, 12 sources.

UAV, DATA TRANSMISSION, SATELLITE COMMUNICATION, DIRECT RADIO COMMUNICATION, MIMO, SIGNAL, METHOD, SYSTEM, MODEL, NETWORK, NODES, MONITORING, MESH, ALGORITHM.

The major goal of this thesis is to research and develop methods for monitoring computer network nodes using unmanned aerial vehicles (UAVs) to enhance efficiency, throughput, and reliability of communication.

During the execution of the qualification work, theoretical foundations and concepts of computer network node monitoring based on UAV swarms were examined. Various methods for monitoring computer networks using UAV swarms were analyzed, and theoretical modeling and optimization of the selected method were conducted. The importance of optimizing UAV swarm control algorithms for effective network monitoring was also discussed.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....                          | 10 |
| ВСТУП .....   | 11 |
| 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ ТА БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ (БПЛА)..... | 12 |
| 1.1 Основні поняття моніторингу мережі.....   | 12 |
| 1.2 Застосування БПЛА у моніторингу.....  | 13 |
| 1.2.1 Огляд ролі БПЛА у моніторингу мережі.....   | 13 |
| 1.2.2 Використання алгоритмів комп'ютерного зору та обробки зображень.....                        | 14 |
| 1.3 Технології та інструменти моніторингу .....   | 14 |
| 1.4 Алгоритми комп'ютерного зору та обробки зображень.....  | 16 |
| 1.5 Інші методи моніторингу .....   | 17 |
| 1.5 Технічні виклики.....   | 19 |
| 1.6 Забезпечення безпеки .....  | 20 |
| 1.7 Легіслятивні та етичні питання .....  | 20 |
| 1.8 Можливості та перспективи.....  | 21 |
| 1.9 Перспективи та розвиток.....  | 21 |
| 1.10 Методи моніторингу на базі рою БПЛА.....   | 22 |
| 1.10.1 Методи збору даних БПЛА.....   | 23 |
| 1.11 Алгоритми моніторингу на базі рою БПЛА.....  | 29 |
| 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ РОЮ БПЛА .....                           | 31 |
| 2.1 Вступ до розділу.....   | 31 |
| 2.2 Опис методів передачі даних.....  | 31 |
| 2.2.1 Прямий радіозв'язок (Direct RF Communication).....  | 31 |
| 2.2.1 Мережа Mesh (Mesh Networking) .....   | 32 |
| 2.2.3 Супутниковий зв'язок (Satellite Communication) .....  | 32 |
| 2.3 Порівняльний аналіз методів .....   | 33 |

|   |    |
|---|----|
| 2.4 Проблематика та її рішення .....  | 34 |
| 2.4.1 Проблеми Direct RF Communication та можливі шляхи вдосконалення ..... | 35 |
| 2.4.2 Проблеми мережі Mesh та їх рішення.....                               | 36 |
| 2.4.3 Проблеми супутникового зв'язку та шляхи їх вирішення ..               | 38 |
| 2.5 Вибір методу для оптимізації .....                                      | 39 |
| 2.5.1 Обґрунтування вибору Direct RF Communication.....                     | 39 |
| 2.5.2 Вибір оптимізації методу .....  | 39 |
| 2.5.3 Підготовка до теоретичного моделювання .....                          | 40 |
| 2.6 Підготовка до теоретичного моделювання .....                            | 40 |
| 2.6.1 Визначення параметрів моделювання.....                                | 40 |
| 2.7 Висновки до розділу .....   | 41 |
| 3 ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРАНОГО МЕТОДУ .....               | 43 |
| 3.1 Вступ до розділу.....   | 43 |
| 3.2 Основи теоретичного моделювання .....                                   | 43 |
| 3.3 Моделювання Direct RF Communication.....                                | 46 |
| 3.3.1 Модуляція сигналу в Direct FM Comunication .....                      | 46 |
| 3.3.2 Параметри радіозв'язку.....   | 48 |
| 3.3.3 Моделювання дальності радіозв'язку.....                               | 51 |
| 3.4 Оптимізація використання MIMO в Direct RF Communication                 | 54 |
| 3.5 Адаптивний Шенон-базований метод передачі даних (ASHBMT).....           | 57 |
| 3.5.1 Визначення та призначення .....                                       | 58 |
| 3.5.2 Математичне формулювання.....   | 58 |
| 3.5.3 Теоретичні аспекти адаптації.....                                     | 59 |
| 3.5.4 Припущення методу .....   | 59 |
| 3.5.5 Алгоритми та процеси оптимізації.....                                 | 60 |
| 3.5.6 Інтеграція з системою MIMO .....                                      | 61 |
| 3.6 Моделювання на основі методу.....                                       | 62 |

|  |    |
|--|----|
| 3.7 Аналіз результатів моделювання.....  | 64 |
| 3.7.1 Вивчення отриманих результатів моделювання.....  | 64 |
| 3.8 Потенційні області застосування та обмеження.....  | 65 |
| 3.8.1 Обговорення можливих сфер застосування оптимізованої системи радіозв'язку .....                            | 65 |
| 3.8.2 Розгляд обмежень та викликів, пов'язаних з практичним впровадженням теоретичних розробок.....              | 67 |
| 4 ВАЖЛИВІСТЬ ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ РОЄМ БПЛА ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО МОНІТОРИНГУ МЕРЕЖІ .....                | 69 |
| 4.1 Глибоке розуміння взаємозв'язку між стабільним радіозв'язком та ефективним моніторингом у мережах БПЛА ..... | 69 |
| 4.1.1 Важливість стабільного радіозв'язку для моніторингу мережі: .....  | 69 |
| 4.1.2 Аналіз можливих рішень:.....   | 69 |
| 4.2 Оптимізація протоколів радіозв'язку для управління роєм БПЛА .....   | 71 |
| 4.2.1 Аналіз сучасних протоколів радіозв'язку для управління роєм БПЛА .....                                     | 71 |
| 4.2.2 Розробка адаптивних та ефективних стратегій радіозв'язку для управління роєм БПЛА.....                     | 72 |
| 4.3 Практичне застосування оптимізованих алгоритмів у мережах БПЛА .....   | 74 |
| 4.3.1 Переваги використання технології тімо в системах радіозв'язку бпла .....                                   | 74 |
| 4.3.2 Інтеграція з розширеними системами контролю.....   | 75 |
| 4.2 Синергія між оптимізацією радіозв'язку та алгоритмами управління.....  | 77 |
| 4.4.1 Вивчення взаємного посилення ефективності радіозв'язку та алгоритмів управління.....                       | 77 |
| 4.4.2 Розгляд потенціалу для подальших досліджень та розвитку ..   | 78 |

|  |    |
|--|----|
| 4.5 Виклики та перспективи у використанні оптимізованих алгоритмів .....   | 80 |
| 4.5.1 Оцінка поточних викликів та можливих обмежень у застосуванні оптимізованих алгоритмів управління роєм БПЛА.... | 80 |
| 4.5.2 Перспективи розвитку та можливі напрямки майбутніх досліджень .....  | 81 |
| ВИСНОВКИ.....  | 84 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....   | 85 |
| ДОДАТОК А ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....  | 87 |
| ДОДАТОК Б ЛІСТИНГ ПРОГРАМ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ .....   | 95 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

MIMO(Multiply-input and multiply-otput) – багатовходовий, багатовихідний зв'язок;

ICMP - Internet Control Message Protocol;

SNMP - Simple Network Management Protocol;

ШІ – штучний інтелект;

RF – радіо частота;

GPS - Глобальна система позиціонування;

дБ (децибел) - міра відношення потужності сигналу або напруги до початкового рівня. Наприклад, дБм (децибел міліватт) використовується для вимірювання потужності сигналу;

Гц (герц) - одиниця вимірювання частоти сигналу. Використовується для вказівки частоти коливань сигналу;

Біт/с (біт на секунду) - одиниця вимірювання швидкості передачі даних. Вказує, скільки бітів пересилається протягом однієї секунди;

Пропускна спроможність - максимальна кількість даних, які можуть бути передані через мережу за одиницю часу.

Мережа - збірні терміни, що описують підключені комп'ютери, пристрої та комунікаційні лінії.

Wi-Fi (Wireless Fidelity) - Локальна мережа (LAN);

LTE (Long-Term Evolution) - Мобільна мережа для передачі даних;

5G (Fifth Generation) - П'яте покоління мобільних комунікаційних технологій.

ASHBMT - Адаптивний Шенон-базований метод передачі даних.

## ВСТУП

В сучасному світі, де комп'ютерні мережі стають не тільки важливою складовою нашого повсякденного життя, але й основою функціонування практично всіх сфер суспільства, їх надійність і продуктивність набувають вирішального значення. Забезпечення оптимальної працездатності та безперебійної роботи мереж - завдання, над якими працюють багато фахівців та дослідників. У цьому контексті моніторинг мережевих вузлів стає вельми актуальною та складною задачею.

Ця кваліфікаційна робота призначена для глибокого дослідження можливостей та переваг використання рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сфері моніторингу комп'ютерних мереж. Саме використання БПЛА для цієї мети надає широкий спектр інноваційних підходів та потенціал для покращення стану мережі та її безпеки. У цьому дослідженні ми плануємо ретельно проаналізувати різноманітні методи, які можуть бути використані для моніторингу мережевих вузлів, зокрема аналіз зображень, використання модулів бездротового зв'язку, вимірювання пропускну здатності, перевірку доступності вузлів та аналіз маршрутів пакетів.

Це дослідження присвячено пошуку і використанню оптимальних методів моніторингу, які дозволять досягти максимальної продуктивності мережі та забезпечити її стабільність в режимі реального часу. Мета цього дослідження полягає в розкритті потенціалу БПЛА як потужного інструменту для моніторингу стану мережі та забезпечення її безпеки. Ми глибоко дослідимо перспективи та переваги використання цих методів, зокрема шляхом аналізу їх застосування для забезпечення стійкості та ефективності сучасних комп'ютерних мереж у вимогливому інформаційному середовищі.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ ТА БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ (БПЛА)

## 1.1 Основні поняття моніторингу мережі

Моніторинг комп'ютерних мереж є важливою складовою сучасних інформаційних та телекомунікаційних систем. Ця практика полягає в систематичному зборі, аналізі та інтерпретації інформації про стан мережі для забезпечення її ефективності та доступності.

Цілі моніторингу мережі можуть бути різноманітними, але включають в себе [1]:

- виявлення аномалій. Вчасне виявлення відмов та незвичайних станів, що дозволяє операторам приймати дієві заходи для відновлення роботи мережі;

- оцінка продуктивності. Моніторинг допомагає визначати, наскільки продуктивно працюють мережеві ресурси, і виявляти можливі транспортні перегрузки;

- забезпечення безпеки. Виявлення аномальної активності та потенційних загроз безпеці для мережі;

- планування ресурсів. На основі даних моніторингу можливо оптимізувати розподіл ресурсів і прогнозувати майбутні потреби мережі.

Вимоги до ефективного моніторингу:

- реальний час. Моніторинг повинен відбуватися в режимі реального часу для оперативного реагування на події в мережі. Це особливо важливо для мереж, де недоступність може призвести до серйозних наслідків;

- інтеграція з системами безпеки. Моніторинг повинен бути інтегрованим з системами безпеки мережі для вчасного виявлення потенційних загроз та швидкого реагування на них;

- широке охоплення параметрів. Важливо відстежувати не лише

технічні параметри, але й параметри, які впливають на користувацький досвід, такі як навантаження та обсяги трафіку;

- **скалабельність.** Система моніторингу повинна бути готова впоратися зі зростаючим обсягом даних та ресурсів мережі;

- **ефективний моніторинг мережі** допомагає забезпечити стабільну роботу мережі та мінімізувати можливі ризики та витрати, пов'язані з її недоступністю.

## 1.2 Застосування БПЛА у моніторингу

Використання Безпілотних Літальних Апаратів (БПЛА) в моніторингу комп'ютерних мереж є однією з перспективних та інноваційних практик, яка дозволяє отримувати унікальні можливості для виявлення та аналізу стану мережі з висоти та в режимі реального часу. Дозвольте розглянути, які аспекти цього застосування роблять його особливо обіцяючим.

### 1.2.1 Огляд ролі БПЛА у моніторингу мережі

БПЛА стали потужним інструментом для візуального та дистанційного спостереження. Вони можуть бути обладнані різними сенсорами та камерами, що надає можливість отримувати відомості про стан мережі, які раніше були недосяжні.

Основні ролі БПЛА в моніторингу мережі включають до себе.

- **візуальне спостереження.** БПЛА можуть здійснювати аерофотозйомку, фіксуючи стан обладнання та інфраструктури мережі;

- **спостереження з висоти.** З висоти пташиного польоту БПЛА можуть виявляти структурні особливості мережі та фізичний стан обладнання, включаючи антени, маршрутизатори та кабелі;

- **маршрутизація і збір даних.** БПЛА можуть здійснювати маршрутизацію пакетів та збирати дані з окремих точок мережі, аналізуючи

трафік та якість підключення [2].

### 1.2.2 Використання алгоритмів комп'ютерного зору та обробки зображень

Однією з ключових технологій, що використовуються в БПЛА для моніторингу, є алгоритми комп'ютерного зору та обробки зображень. Ці алгоритми дозволяють автоматично аналізувати зображення, отримані з камер БПЛА, та виявляти аномалії та стани обладнання.

Застосування цих алгоритмів включає в себе:

- виявлення аномалій. Автоматичне виявлення аномалій на зображеннях, таких як дефекти обладнання, корозія антен, пошкодження кабелів тощо;

- класифікація стану. Визначення стану обладнання та ідентифікація його технічних характеристик;

- оцінка середовища. Вимірювання параметрів середовища, таких як температура, вологість та рівень сигналу, що можуть впливати на стабільність мережі.

Завдяки цим застосуванням БПЛА можуть надавати операторам мережі цінну інформацію про стан і допомагати в реагуванні на можливі проблеми значно швидше, ніж традиційні методи моніторингу.

### 1.3 Технології та інструменти моніторингу

Для ефективного моніторингу комп'ютерних мереж на базі рою БПЛА використовуються різні технології та інструменти. Цей розділ допоможе розібратися у найбільш актуальних методах, які забезпечують надійний та ефективний моніторинг.

Системи GPS та навігації.

БПЛА потребують точної системи навігації для виконання завдань

моніторингу мережі. Системи GPS (Global Positioning System) є основними в цьому контексті. Вони забезпечують точне визначення місця знаходження БПЛА та дозволяють планувати оптимальні маршрути польоту.

Високоякісні камери та сенсори.

Одним із найважливіших аспектів моніторингу є якість обладнання, встановленого на БПЛА. Для отримання високоякісних зображень та даних використовують високороздільні камери та сенсори. Вони дозволяють отримувати деталізовану інформацію про стан мережевих вузлів.

Телекомунікаційні протоколи.

БПЛА повинні мати надійний канал зв'язку для передачі даних операторам мережі. Використовують телекомунікаційні протоколи, які забезпечують безперебійний обмін даними та забезпечують захист інформації.

Апаратне та програмне забезпечення.

Для ефективного моніторингу використовують апаратне та програмне забезпечення на БПЛА. Це включає в себе контролери, які керують БПЛА, а також програми для збору та обробки даних. Програмне забезпечення може включати алгоритми для аналізу зображень, визначення аномалій та автоматичного відправлення повідомлень про проблеми.

Захист від зовнішніх впливів.

БПЛА під час моніторингу можуть зустрічати різні зовнішні фактори, такі як негода, перешкоди на маршруті, або навіть кіберзагрози. Для забезпечення надійності та безпеки використовують системи захисту від зовнішніх впливів, які допомагають уникнути негативних наслідків.

Збір та аналіз даних.

Системи моніторингу включають в себе системи збору та аналізу даних. Вони забезпечують обробку інформації, отриманої від БПЛА, та дозволяють операторам швидко реагувати на виявлені проблеми в мережі.

Використання цих технологій та інструментів робить моніторинг мережі на базі рою БПЛА надійним та ефективним процесом. Вони дозволяють отримувати важливу інформацію для забезпечення стабільності мережі та

реагувати на можливі проблеми в реальному часі.

#### 1.4 Алгоритми комп'ютерного зору та обробки зображень

Алгоритми комп'ютерного зору та обробки зображень є ключовим елементом в системах моніторингу мережі на базі рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Вони дозволяють аналізувати отримані зображення та виділяти з них важливу інформацію для виявлення стану мережевих вузлів та ідентифікації можливих аномалій. Цей розділ розкриє ключові аспекти використання алгоритмів комп'ютерного зору та обробки зображень у системах моніторингу мережі [3].

Основні завдання аналізу зображень:

- алгоритми комп'ютерного зору застосовуються для різноманітних завдань аналізу зображень;
- визначення стану обладнання. Виявлення фізичного стану мережевого обладнання, такого як сервери, комутатори, маршрутизатори тощо. Це включає виявлення пошкоджень, надмірного нагріву, або інших аномалій;
- ідентифікація компонентів мережі. Розпізнавання конкретних пристроїв та компонентів мережі на зображеннях. Це дозволяє відстежувати стан кожного компонента окремо;
- виявлення аномалій. Виявлення незвичайних або підозрілих явищ, таких як незаплановані об'єкти, дим, витоки рідин тощо;
- моніторинг стану дротів та з'єднань. Перевірка ідентифікації і стану дротів та з'єднань між мережевими компонентами.

Використання алгоритмів для відслідковування змін.

Однією з ключових можливостей алгоритмів комп'ютерного зору є відслідковування змін в часі. Вони дозволяють виявляти динамічні аномалії та моніторити розвиток подій в мережі. Наприклад, алгоритми можуть слідкувати за змінами температури, рухом обладнання, зміною конфігурації

тощо.

Обробка та аналіз даних.

Обробка зображень включає в себе такі завдання, як фільтрація, сегментація, відстеження руху, визначення форм та вибіркового аналізу областей інтересу на зображеннях. Ці процедури допомагають виділяти та аналізувати важливі області на зображеннях.

Алгоритми аналізу зображень можуть забезпечити такі можливості, як:

- розпізнавання об'єктів. Визначення та ідентифікація конкретних об'єктів на зображеннях;
- виявлення руху. Відстеження рухомих об'єктів на зображеннях та визначення їхньої траєкторії;
- аналіз кольору та текстури. Визначення відмінностей в кольорі та текстурі об'єктів на зображеннях;
- сегментація зображень. Розділення зображення на окремі частини для подальшого аналізу;
- аналіз отриманих даних допомагає виявляти потенційні проблеми в мережі, передбачати їх розвиток та вчасно приймати необхідні заходи.

Алгоритми комп'ютерного зору та обробки зображень є ключовою складовою систем моніторингу мережі на базі рою БПЛА. Вони дозволяють отримувати важливу інформацію для забезпечення безпеки та ефективності мережевих операцій.

### 1.5 Інші методи моніторингу

Однією з ключових задач моніторингу комп'ютерних мереж є вимірювання мережевої пропускної здатності та виявлення інших параметрів, які впливають на якість та продуктивність мережі. В даному розділі розглянуті основні методи для вимірювання пропускної здатності та інші підходи до моніторингу.

Вимірювання пропускної здатності:

- вимірювання пропускної здатності між вузлами мережі є критичним для оцінки її продуктивності. Для цього використовуються різні методи та інструменти;

- інструменти моніторингу мережі. Багато інструментів моніторингу надають звіти про використання пропускної здатності мережі та затримки між вузлами. Вони дозволяють операторам мережі визначити, як добре працює мережа;

- тестування пропускної здатності. За допомогою спеціальних інструментів можна провести тестування пропускної здатності для визначення її реальних можливостей. Це важливо для планування мережі та виявлення проблем.

Перевірка доступності вузлів мережі є важливою для вчасного виявлення проблем та аномалій. Для цього використовуються різні методи, включаючи:

- ICMP-запити (ping). Перевірка доступності вузла шляхом відправлення ICMP-запитів та очікування відповіді. Цей метод дозволяє виявити вузли, які можуть бути недоступними або мають високу затримку;

- SNMP-запити. Використання SNMP-запитів для збору інформації про стан мережевого обладнання, включаючи комутатори, маршрутизатори та сервери.

Відслідковування маршрутів пакетів є важливим аспектом моніторингу мережі. Воно дозволяє визначити, яким шляхом проходять пакети в мережі та виявити можливі затримки чи аномалії. Для відслідковування використовуються такі методи:

- Traceroute. Використання Traceroute для визначення маршруту, яким проходять пакети до кінцевої точки. Цей метод допомагає виявити вузли з великими затримками;

- аналіз заголовків пакетів. Вивчення заголовків пакетів для виявлення незвичайних затримок чи неправильного маршрутування.

Аналіз заголовків пакетів є іншим методом моніторингу мережі, який

дозволяє виявити аномалії та проблеми. Він включає:

- пошук відхилень від норми. Аналіз заголовків пакетів для виявлення незвичайних показників, таких як велика кількість відкинутих пакетів або незвичайні IP-адреси;

- виявлення декодованих заголовків. Розкодування та аналіз зашифрованих або стиснутих заголовків для забезпечення точності аналізу.

Технології Інтернет речей (IoT) використовуються для моніторингу стану пристроїв та компонентів мережі. Датчики та пристрої IoT збирають дані про температуру, вологість, викиди, інтенсивність використання та інші параметри, що впливають на роботу мережі.

Для аналізу великих обсягів даних, що збираються в мережі, використовуються системи аналізу даних. Ці системи дозволяють виявляти закономірності, структурувати дані та генерувати звіти.

У цьому розділі були розглянуті основні методи моніторингу мережі, включаючи вимірювання пропускну здатності, перевірку доступності, відслідковування маршрутів пакетів, аналіз заголовків пакетів, використання технологій Інтернету речей та систем аналізу даних. Вони допомагають забезпечити ефективний моніторинг та управління мережею для забезпечення її надійності та продуктивності.

### 1.5 Технічні виклики

Сучасне використання БПЛА в моніторингу мережі стикається з рядом технічних викликів, які суттєво впливають на ефективність моніторингу. Однією з цих проблем є обмежені ресурси самого БПЛА, включаючи обмежену пропускну здатність для передачі даних. Це може обмежити швидкість та обсяг інформації, яку можна передавати в режимі реального часу. Розробники систем моніторингу повинні вирішувати завдання оптимізації передачі даних, щоб забезпечити максимальну продуктивність БПЛА та ефективність збору інформації.

Крім того, стабільність та надійність зв'язку між БПЛА та серверами моніторингу також є складною задачею. Технічні перешкоди, такі як перешкоди в бездротовому зв'язку, обмежена дальність передачі сигналу, а також проблеми із забезпеченням достатньої сигнальної сили можуть призвести до втрати даних та недостатньої доступності системи моніторингу. Для розв'язання цих проблем розробники повинні шукати нові технічні рішення та вдосконалювати антени та антенні системи для підвищення стабільності зв'язку.

### 1.6 Забезпечення безпеки

Питання безпеки є однією з найактуальніших проблем при використанні БПЛА для моніторингу мережі. БПЛА може стати об'єктом хакерських атак, інтерференції та фізичних втручань. Недостатня захищеність може призвести до доступу несанкціонованих осіб до системи моніторингу та може поставити під загрозу конфіденційні дані. З метою забезпечення безпеки, необхідно ретельно розробити та впровадити стратегії безпеки для захисту БПЛА та забезпечення конфіденційності та цілісності даних, що передаються між БПЛА та серверами моніторингу. Криптографічні методи захисту даних та механізми автентифікації стають ключовими аспектами забезпечення безпеки. Розробники повинні ретельно аналізувати загрози безпеці, оцінювати ризики та розробляти ефективні заходи для запобігання атакам і захисту важливої інформації.

### 1.7 Легіслативні та етичні питання

Використання БПЛА для моніторингу мережі також пов'язане з легіслативними та етичними питаннями. Різні країни мають різні закони та політики, що стосуються авіації та приватності, і це може вплинути на можливість використання БПЛА для моніторингу. Розробники систем моніторингу повинні дотримуватися вимог міжнародних та національних

законів, які регулюють авіацію та застосування БПЛА, і враховувати вимоги щодо дозволів і ліцензій.

Окрім того, етичні аспекти, включаючи збір та використання даних, мають бути детально розглянуті. Важливо дотримуватися принципів конфіденційності та забезпечити, що зібрані дані використовуються лише у відповідності до закону та з урахуванням правил етики. Розробники систем моніторингу повинні враховувати права та інтереси користувачів та інших зацікавлених сторін при зборі та використанні інформації.

### 1.8 Можливості та перспективи

Незважаючи на технічні та безпекові виклики, використання БПЛА в моніторингу мережі відкриває широкі можливості для інновацій та покращення. Можливості автоматизації процесу моніторингу, розвиток штучного інтелекту для аналізу даних, та впровадження нових сенсорів дозволять покращити якість моніторингу та швидкість виявлення аномалій.

### 1.9 Перспективи та розвиток

У цьому розділі досліджується перспектива подолання технічних та безпекових викликів, враховуючи найкращі практики та інноваційні технології. Основними напрямками розвитку є розширення функціональності БПЛА.

Розробники повинні прагнути до:

- розширення можливостей безпілотних літальних апаратів, включаючи підвищення часу польоту, покращення систем енергозабезпечення;
- впровадження більш потужних сенсорів [4];
- вдосконалення систем зв'язку.

Розробники мають шукати нові підходи для поліпшення стабільності та забезпечення безпеки зв'язку між БПЛА та серверами моніторингу. Це

включає в себе розробку більш потужних та далекосяжних антенних систем, а також використання передових технологій безпроводового зв'язку.

Інтеграція із штучним інтелектом (ШІ). Використання ШІ для аналізу даних, отриманих від БПЛА, може значно підвищити точність та швидкість виявлення аномалій у мережі. Подальший розвиток цього напрямку може зробити моніторинг більш ефективним та автоматизованим.

Було проведено аналіз основних проблем та перспектив використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для моніторингу комп'ютерних мереж. Важливими висновками є:

- моніторинг мережі на базі рою БПЛА відкриває широкі можливості для покращення якості та ефективності моніторингу;
- технічні виклики, такі як обмеження часу польоту, стабільність зв'язку та енергозабезпечення, вимагають пошуку та вдосконалення технологічних рішень;
- забезпечення безпеки та конфіденційності даних є критичним аспектом використання БПЛА для моніторингу мереж;
- інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в процес аналізу отриманих даних може значно підвищити точність та швидкість виявлення аномалій;
- подальший розвиток та дослідження у галузі моніторингу мережі з використанням БПЛА мають великий потенціал і вимагають подальших наукових досліджень та практичних реалізацій.

З урахуванням вищезазначених факторів, моніторинг мережі на базі рою БПЛА може стати дієвим інструментом для забезпечення надійності та безпеки комп'ютерних мереж в майбутньому.

### 1.10 Методи моніторингу на базі рою БПЛА

У цьому розділі розглядаються методи моніторингу комп'ютерних мереж на базі рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Розглянемо різні підходи та методи, що використовуються для забезпечення ефективного

моніторингу та стабільності мереж.

### 1.10.1 Методи збору даних БПЛА

У цьому розділі ми розглянемо різноманітні методи та технології, які використовуються для збору даних за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Збір даних є однією з ключових складових ефективного моніторингу мереж, і використання БПЛА в цьому контексті надає ряд унікальних можливостей.

Типи сенсорів та їх застосування.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) використовують різні типи сенсорів для збору різноманітних даних про стан комп'ютерних мереж та їхнього оточення. Нижче ми розглянемо деякі типи сенсорів і їх застосування в контексті моніторингу мереж.

#### 1 Камери та відеокамери:

- застосування. Камери та відеокамери є одними з найбільш поширеними сенсорами на БПЛА. Вони забезпечують візуальний доступ до оточення і фіксують зображення та відео високої роздільної здатності;

- моніторинг інфраструктури. Камери дозволяють відстежувати стан мережевого обладнання, як наприклад серверів, комутаторів, маршрутизаторів тощо. Це важливо для виявлення будь-яких аномалій чи несправностей;

- візуальний аналіз. Відеозаписи можуть бути використані для виявлення недоліків в фізичній інфраструктурі, таких як пошкодження кабелів, перегріву чи пожеж.

#### 2 Термальні інфрачервоні сенсори:

- застосування. Термальні інфрачервоні сенсори спеціалізовані на вимірюванні температури об'єктів і візуальному відображенні цих температур;

- виявлення перегріву. Такі сенсори допомагають виявити перегрів обладнання або надзвичайні температурні зміни, що можуть призвести до відмов;

- ідентифікація енергозбою. Термальні інфрачервоні сенсори дозволяють виявляти джерела тепла, що може бути корисним для виявлення проблем електропостачання чи незаконного споживання електроенергії.

### 3 GPS та навігаційне обладнання:

- застосування. GPS та навігаційне обладнання визначають місцезнаходження БПЛА та виконують навігацію під час місії;
- створення карт мережі. Завдяки GPS, можливо створювати карту мережі та відстежувати переміщення БПЛА під час моніторингу;
- системи координат. GPS надає точні координати місцезнаходження, що важливо для точної локалізації можливих проблем у мережі.

### 4 Акустичні датчики:

- застосування. Акустичні датчики зафіксують звукові сигнали і можуть бути використані для виявлення аномальних подій;
- виявлення аномального шуму. Акустичні датчики можуть виявити незвичайні звуки або вибухи, що може свідчити про можливі проблеми в мережі;
- звуковий моніторинг обладнання. Звук може бути використаний для виявлення аномалій в роботі обладнання, таких як шум вентиляторів чи механічних дефектів.

### 5 Інтеграція різних типів сенсорів:

Унікальність БПЛА полягає в їхній здатності інтегрувати різні типи сенсорів для комплексного моніторингу мереж. Наприклад, об'єднуючи камери та термальні інфрачервоні сенсори, можна одночасно виявити фізичні проблеми та перегрів обладнання, підвищуючи ефективність моніторингу.

### 6 Технологічні вдосконалення.

З огляду на швидкі технологічні зміни, сучасні БПЛА вдосконалюються надзвичайно швидко. Технологічні вдосконалення включають:

- автономність. Деякі сучасні БПЛА вже в змозі приймати рішення та здійснювати моніторинг без значного втручання оператора;
- реальний час. БПЛА здатні надавати дані у реальному часі, що

дозволяє операторам реагувати на проблеми миттєво;

- системи стійкості до погодних умов. Вдосконалені БПЛА можуть працювати в різних погодних умовах, включаючи дощ, сніг і сильний вітер;
- автоматичне управління. Деякі БПЛА вже можуть виконувати автономні завдання, відтак оператору залишається менше рутинних обов'язків.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) використовують різні типи сенсорів для збору великої кількості даних про стан комп'ютерних мереж та їхнього оточення. Ці дані відіграють критичну роль у забезпеченні ефективності та надійності моніторингу мереж. Нижче наведено загальний огляд даних, які можуть бути зібрані за допомогою сенсорів на БПЛА.

#### 1 Відео та фотоматеріали:

- застосування. Відео та фотоматеріали, отримані від камер та відеокамер на БПЛА, надають візуальну інформацію про стан мережі та навколишнє середовище;

- візуальний аналіз стану обладнання. Зняті зображення можуть бути використані для виявлення фізичних пошкоджень, стану обладнання та виявлення несправностей;

- документування змін у структурі мережі. Фотографії структури мережі допомагають створити точну карту та документувати зміни з часом,

#### 2 Температурні дані:

- застосування. Термальні інфрачервоні сенсори вимірюють температуру об'єктів та довкілля;

- виявлення перегріву обладнання. Термальні дані дозволяють операторам виявити вибухи температури, що може бути індикатором проблем у мережі, таких як перегрів маршрутизаторів чи комутаторів;

- моніторинг енергоспоживання. Термальні дані використовуються для контролю за ефективністю системи охолодження та стану енергозберігаючого обладнання,

#### 3 Геолокаційні дані:

- застосування. GPS та навігаційне обладнання БПЛА надають

геолокаційні дані, які дозволяють точно визначити місцезнаходження та маршрути руху апарату;

- створення карт мережі. Геолокаційні дані допомагають створити точну карту мережі та локалізувати вузли та обладнання;

- відстеження місцезнаходження БПЛА. GPS дозволяє точно відстежувати рух БПЛА під час місій та піддавати аналізу його маршрут,

#### 4 Звукові дані:

- застосування. Акустичні датчики збирають звукові дані, що можуть бути використані для виявлення аномальних подій та стану об'єктів;

- виявлення аномального шуму. Звукові дані можуть виявляти незвичайні звуки, що може свідчити про можливі проблеми, такі як зламані обладнання чи несправності;

- звуковий моніторинг обладнання. Шум, виникаючий внаслідок роботи обладнання, може бути використаний для виявлення можливих аномалій та зносу.

Ці дані, зібрані різними сенсорами на БПЛА, є критичними для розуміння стану комп'ютерних мереж та виявлення можливих проблем. Вони надають операторам цінні інструменти для ефективного моніторингу та підтримки стабільності мережі.

Один із важливих аспектів використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в моніторингу комп'ютерних мереж - це інтеграція різних типів сенсорів. Інтеграція дозволяє комбінувати дані з різних джерел для отримання більш повної та корисної інформації, що поліпшує якість аналізу та виявлення можливих проблем.

#### Об'єднання теплового та візуального аналізу:

- застосування. Одним із прикладів ефективної інтеграції сенсорів є комбінування теплового та візуального аналізу для виявлення перегріву вузлів мережі та одночасного відстеження місцеположення БПЛА;

- виявлення перегріву. Сполучення теплового та візуального аналізу дозволяє операторам точно визначити гарячі точки в мережі, а теплові

зображення вказують на зони перегріву;

- відстеження руху БПЛА. Візуальний аналіз допомагає визначити місцеположення БПЛА, а теплові дані можуть вказати на їхню активність та динаміку в реальному часі.

Інтеграція акустичного та геопросторового аналізу:

- застосування. Інтеграція акустичного та геопросторового аналізу може бути корисною для виявлення аномалій та спостереження за станом мережі в об'єктах із високою ризиковістю;

- виявлення аномалій звуку. Акустичний аналіз може виявити незвичайний шум або аномальні звуки, що може бути індикатором проблеми;

- геолокаційний контекст. Геолокаційний аналіз допомагає розташувати джерела звуку у просторі, дозволяючи операторам швидко реагувати на події.

Інтеграція різних сенсорів допомагає створити комплексну картину стану мережі та подій навколо неї. Вона також підвищує точність аналізу та робить моніторинг більш ефективним та надійним, забезпечуючи операторам більше можливостей для реагування на можливі загрози та проблеми.

Технологічні вдосконалення в сфері безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відіграють важливу роль у розвитку методів збору даних та моніторингу комп'ютерних мереж. Останні досягнення в цій галузі дозволяють покращити якість та ефективність моніторингу. Розглянемо деякі з найсуттєвіших технологічних вдосконалень, що стосуються використання БПЛА в моніторингу мереж.

Автономність:

- застосування. Автономність в цьому контексті вказує на здатність БПЛА виконувати завдання та приймати рішення без постійного контролю оператора;

- самостійні місії. Автономність дозволяє БПЛА виконувати заплановані місії без постійного керування, що зменшує навантаження на оператора та робить моніторинг більш ефективним;

- автономне виявлення проблем. Деякі системи можуть виявляти аномалії та проблеми в мережі та при необхідності вживати заходи для їх вирішення;

Робота в режимі реального часу:

- застосування. Робота в режимі реального часу передбачає здатність БПЛА надавати дані та виконувати аналіз мережі миттєво, без затримок;

- миттєва реакція на події. БПЛА, які працюють в режимі реального часу, забезпечують операторам негайну інформацію про стан мережі, що дозволяє швидко реагувати на можливі проблеми;

- стрімкість аналізу. БПЛА можуть виконувати аналіз даних та надавати результати практично в реальному часі, що полегшує виявлення аномалій.

Підвищена стійкість до змін погодних умов:

- застосування. Підвищена стійкість до змін погодних умов дозволяє БПЛА працювати ефективно в різних умовах;

- моніторинг у будь-яку погоду. БПЛА, які витримують вплив погодних умов, забезпечують стабільний моніторинг, навіть при поганій погоді;

- розширені можливості в ускладнених умовах. Здатність працювати в ускладнених погодних умовах дозволяє моніторити мережу в областях з надзвичайними умовами, такими як території зі значними кліматичними коливаннями.

Автоматичне управління:

- застосування. Автоматичне управління означає, що БПЛА може виконувати деякі завдання без втручання оператора;

- автоматична навігація. БПЛА можуть автоматично планувати маршрути та уникати перешкод, забезпечуючи безпеку та ефективність місій;

- самодіагностика та ремонт: Деякі системи мають здатність виявляти несправності та навіть виконувати автоматичний ремонт апаратури.

Технологічні вдосконалення значно розширюють можливості використання БПЛА для моніторингу мереж. Вони роблять моніторинг більш

ефективним та надійним, забезпечуючи операторам більше інструментів для збору даних та виявлення можливих проблем. Завдяки цим досягненням, методи збору даних з використанням БПЛА відкривають широкі можливості для збору інформації про стан комп'ютерних мереж та використання її для підтримки стабільності та безпеки.

### 1.11 Алгоритми моніторингу на базі рою БПЛА

У цьому розділі ми ретельно розглянемо різні алгоритми та стратегії, які використовуються для керування та координації роїв безпілотних літальних апаратів (БПЛА) під час моніторингу комп'ютерних мереж. Порівняємо різні підходи та визначимо їх переваги та обмеження в різних сценаріях моніторингу мережі.

Централізоване керування:

- застосування. Централізоване керування включає центральний пункт керування, який координує дії всіх БПЛА у рої;
- координація інтелектуальних агентів. В цьому підході кожен БПЛА є інтелектуальним агентом, який надсилає дані до центрального пункту керування та отримує від нього команди для оптимального виконання місії;
- можливість централізованого аналізу. Централізована система може здійснювати більш складний аналіз даних та виконувати докладну координацію всіх БПЛА в реальному часі.

Розподілене керування:

- застосування. Розподілене керування передбачає, що кожен БПЛА в рої взаємодіє з іншими апаратами для досягнення загальної мети;
  - локальні рішення. Кожен БПЛА приймає рішення на основі власної інформації та обмінюється нею з іншими членами рою для підтримки координації та запобігання колізіям;
  - зменшення навантаження на центральний пункт керування.
- Розподілені системи дозволяють розподілити завдання між БПЛА,

зменшуючи потребу в централізованому керуванні.

Змішане керування:

- застосування. Змішане керування поєднує переваги централізованого та розподіленого підходів;

- локальні рішення з централізованим керуванням. БПЛА можуть приймати локальні рішення на основі власної інформації, але також співпрацювати з центральним пунктом керування для досягнення загальної мети;

- гнучкість та швидкість реакції. Змішані системи дозволяють поєднати гнучкість розподіленого керування зі здатністю до швидкої централізованої реакції на надзвичайні події.

Алгоритми моніторингу на базі рою БПЛА варіюються в залежності від конкретних сценаріїв та вимог моніторингу мережі. Вибір відповідної стратегії керування та координації грає важливу роль у досягненні ефективності та точності моніторингу. В розділі будемо порівнювати ці алгоритми та визначати їх переваги та обмеження у різних сценаріях моніторингу мережі.

## 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ РОЮ БПЛА

### 2.1 Вступ до розділу

Метою цього розділу є всебічний аналіз кожного з цих методів з метою визначення їхньої придатності для використання в мережах БПЛА. Ми розглянемо ключові технічні аспекти, включаючи ефективність передачі даних, дальність зв'язку, надійність, масштабованість та вартісні показники. Крім того, будуть виявлені основні проблеми, пов'язані з кожним методом, та розглянуті потенційні шляхи їх вирішення.

Завданням цього розділу є не лише порівняння методів, а й визначення оптимального підходу для подальшого дослідження. Вибір конкретного методу для глибшого аналізу та оптимізації в наступному розділі базуватиметься на висновках, зроблених на основі детального порівняльного аналізу та оцінки кожного методу в контексті конкретних вимог мережі БПЛА.

Цей розділ буде важливим для розуміння того, які методи передачі даних найкраще підходять для використання в рої БПЛА, враховуючи специфічні вимоги та обмеження, з якими можуть зіткнутися ці системи. Результати цього аналізу ляжуть в основу вибору методу, який буде предметом подальшого дослідження та теоретичного моделювання у наступному розділі роботи.

### 2.2 Опис методів передачі даних

#### 2.2.1 Прямий радіозв'язок (Direct RF Communication)

Опис методу: Direct RF Communication використовує радіочастотний спектр для безпосередньої комунікації між БПЛА або між БПЛА та наземною станцією. Це базовий метод для передачі даних на короткі відстані [5].

Переваги:

- простота впровадження та низька вартість;
- ефективний для короткодистанційного зв'язку.

Обмеження:

- обмежена дальність зв'язку;
- вразливість до перешкод та інтерференцій;
- обмежена пропускна спроможність.

### 2.2.1 Мережа Mesh (Mesh Networking)

Опис методу: У мережі Mesh кожен БПЛА діє як вузол, що може передавати дані іншим вузлам, створюючи динамічну, гнучку мережу. Це забезпечує покращену дальність та надійність зв'язку.

Переваги:

- висока надійність та здатність до самовідновлення;
- покращена дальність зв'язку через ретрансляцію сигналів;
- гнучкість у формуванні мережі.

Обмеження:

- складність управління мережею;
- збільшення затримки з ростом мережі;
- проблеми масштабування в більших мережах.

### 2.2.3 Супутниковий зв'язок (Satellite Communication)

Опис методу: Супутниковий зв'язок використовує супутники для передачі даних між БПЛА та наземною станцією. Це дозволяє забезпечити зв'язок на великі відстані, навіть у віддалених та складних для досягнення регіонах.

Переваги:

- велика дальність покриття;
- висока надійність та стабільність зв'язку;

Обмеження:

- висока вартість обладнання та експлуатації;
- затримка сигналу, особливо з геостаціонарними супутниками;
- обмежена пропускна спроможність та вразливість до погодних умов.

У наступних підрозділах ми проведемо порівняльний аналіз цих методів, розглянемо їхні основні проблеми та запропонуємо потенційні рішення. Це дозволить нам обрати найбільш перспективний метод для подальшої оптимізації та теоретичного моделювання.

### 2.3 Порівняльний аналіз методів

У цьому підрозділі проведено порівняльний аналіз трьох основних методів передачі даних (Direct RF Communication, Мережа Mesh та Супутниковий зв'язок), зосередившись на їх ефективності, надійності, масштабованості, вартості та інших ключових аспектах.

#### 1 Ефективність передачі даних

**Direct RF Communication:** Ефективна для коротких відстаней з високою пропускною спроможністю, але має обмеження на більших дистанціях.

**Мережа Mesh:** Забезпечує вищу ефективність у складних мережах з множинними вузлами, але може страждати від затримок і зменшення пропускної спроможності зі збільшенням кількості вузлів.

**Супутниковий зв'язок:** Підходить для великих дистанцій, але має відносно низьку пропускну спроможність та вищі затримки порівняно з іншими методами.

#### 2 Надійність та стійкість

**Direct RF Communication:** Менш стійка до фізичних перешкод та

інтерференцій.

Мережа Mesh: Висока надійність завдяки можливості перенаправлення даних через альтернативні маршрути.

Супутниковий зв'язок: Висока надійність у стабільних умовах, але може бути вразливий до погодніх умов.

### 3 Масштабованість та гнучкість

Direct RF Communication: Обмежена масштабованість через обмеження дальності та кількості каналів.

Мережа Mesh: Висока гнучкість та масштабованість, особливо в динамічних умовах.

Супутниковий зв'язок: Обмежена масштабованість через обмежену пропускну спроможність супутникових каналів.

### 4 Вартість впровадження та експлуатації

Direct RF Communication: Найнижча вартість установки та експлуатації.

Мережа Mesh: Вартість залежить від складності мережі та кількості вузлів.

Супутниковий зв'язок - найвища вартість через необхідність супутникового обладнання та часу передачі.

На основі цього аналізу ми можемо визначити оптимальний метод передачі даних для використання в мережах БПЛА, враховуючи конкретні потреби та обмеження проекту. Наступний крок полягатиме у глибокому дослідженні проблематики кожного методу та розробці потенційних рішень для покращення їх ефективності.

#### 2.4 Проблематика та її рішення

У цьому підрозділі ми розглянемо основні проблеми, пов'язані з кожним з трьох методів передачі даних (Direct RF Communication, Мережа Mesh, Супутниковий зв'язок), та обговоримо можливі рішення для цих проблем.

#### 2.4.1 Проблеми Direct RF Communication та можливі шляхи вдосконалення

Direct RF Communication є фундаментальним методом комунікації між БПЛА в мережі [5]. Незважаючи на свою широку застосовність, цей метод має ряд важливих обмежень, які варто розглянути детальніше.

##### 1. Обмежена дальність зв'язку:

- проблема. Сигнал радіозв'язку ослабляється з відстанню, що обмежує ефективність використання в широких мережах;

- можливе рішення. Використання потужніших передавачів і вдосконалення приймальних антен. Це може збільшити діапазон сигналу, дозволяючи БПЛА взаємодіяти на більшій відстані.

##### 2. Вразливість до перешкод і інтерференцій:

- проблема. Радіосигнали можуть зазнавати перешкод від різних джерел, включаючи природні умови та інші електронні пристрої;

- можливе рішення. Розробка і застосування складних алгоритмів модуляції та кодування, які можуть ефективно протистояти перешкодам і забезпечити стабільну передачу даних.

##### 3. Обмежена пропускна спроможність:

- проблема. Існуюча пропускна спроможність може виявитися недостатньою для передачі великих об'ємів даних або при передачі даних в умовах високої щільності мережі;

- можливе рішення. Використання передових технологій, таких як MIMO (Multiple Input Multiple Output), для збільшення пропускної спроможності без збільшення частотного спектру.

Також, для кращого розуміння проблеми обмеженої пропускної

спроможності, можна розглянути детальну таблицю (таблиця 2.1), яка демонструє потенційні вдосконалення з використанням технології МІМО.

Таблиця 2.1 – Таблиця потенціальних вдосконалень з використанням МІМО

| Параметр               | Проблема в традиційних системах | Потенційні вдосконалення з МІМО | Вплив на мережі БПЛА             |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Пропускна спроможність | Обмеження шириною каналу        | Множинні незалежні канали       | Збільшення об'єму передачі даних |
| Стабільність сигналу   | Чутливість до перешкод          | Зменшення впливу перешкод       | Підвищення надійності зв'язку    |
| Надійність зв'язку     | Залежність від одного каналу    | Просторове розмаїття            | Підвищення стійкості до збоїв    |
| Адаптивність до умов   | Фіксована конфігурація          | Гнучкість конфігурації          | Адаптація до різних умов         |

Цей детальний аналіз допоможе нам зрозуміти, яким чином можна покращити ефективність Direct RF Communication у мережі БПЛА, що є критично важливим для забезпечення надійного та ефективного зв'язку в широкомасштабних або складних мережеских умовах.

#### 2.4.2 Проблеми мережі Mesh та їх рішення

Мережа Mesh відіграє важливу роль у розширенні можливостей комунікації в мережах БПЛА, проте існують специфічні виклики, що потребують уваги та вирішення.

- 1 Складність управління мережею з ростом її розміру:

- проблема. По мірі розширення мережі Mesh, управління трафіком та маршрутизація стають складнішими, що може призвести до підвищення затримок та зниження загальної продуктивності;

- можливе рішення. Впровадження авангардних алгоритмів маршрутизації, які використовують штучний інтелект або машинне навчання для оптимізації шляхів передачі даних і зменшення затримок. Розробка інтелектуальних систем управління, які можуть динамічно адаптуватися до змін у мережі, також відіграє ключову роль.

## 2 Збільшення затримок та зниження пропускної спроможності з кількістю вузлів:

- проблема. З кожним додатковим вузлом в мережі збільшується ймовірність затримок та перегруження мережі, що може негативно позначатися на загальній ефективності;

- можливе рішення. Застосування більш ефективних технологій передачі даних, таких як протоколи з високою пропускною спроможністю та низькими затримками. Також важливим є використання адаптивних методів для балансування навантаження в мережі, забезпечуючи рівномірний розподіл трафіку.

## 3 Проблеми масштабування в більших мережах:

- проблема. Великі мережі Mesh можуть виявитися вразливими до проблем зі стабільністю та ефективністю;

- можливе рішення. Розробка модульних та гнучких мережевих рішень, що дозволяють легко розширювати та зменшувати мережу без значного впливу на її загальну продуктивність. Використання хмарних технологій може також забезпечити додаткову гнучкість і масштабованість.

Ці рішення відіграють важливу роль у покращенні функціональності та ефективності мереж Mesh в контексті моніторингу комп'ютерних мереж на базі рою БПЛА, що є ключовим аспектом для забезпечення надійного та ефективного зв'язку в різних умовах.

### 2.4.3 Проблеми супутникового зв'язку та шляхи їх вирішення

Супутниковий зв'язок відіграє ключову роль у забезпеченні глобального покриття для мереж БПЛА, але має свої специфічні виклики, які варто більш детально розглянути.

#### 1 Висока вартість обладнання та експлуатації:

- проблема. Супутникове обладнання та час передачі даних можуть бути досить дорогими, що обмежує широке використання цього методу, особливо у бюджетно обмежених проектах;

- можливе рішення. Інтеграція супутникового зв'язку з наземними мережами для оптимізації вартості. Використання малих супутників або низькоорбітальних супутників, що може знизити вартість запуску та експлуатації.

#### 2 Затримка сигналу, особливо з геостаціонарними супутниками:

- проблема. Затримки у передачі сигналу можуть становити серйозну проблему для додатків, яким потрібна висока швидкість реакції;

- можливе рішення. Використання низькоорбітальних супутникових систем, які мають значно менші затримки порівняно з геостаціонарними супутниками. Також можна застосовувати передові алгоритми передачі даних для мінімізації затримок.

#### 3 Вразливість до погодних умов:

- проблема. Супутниковий зв'язок може бути вразливий до погодних умов, таких як важка хмарність, дощ або сонячна активність;

- можливе рішення. Використання більш робастних частотних діапазонів, таких як Ка-діапазон, які менше піддаються впливу погодних умов. Також можна розробити протоколи, які динамічно адаптуються до змін у атмосферних умовах.

Враховуючи ці виклики та потенційні рішення, можна значно підвищити ефективність та доступність супутникового зв'язку для мереж БПЛА, що робить його більш привабливим варіантом для глобального моніторингу та

управління.

Загалом, ці підходи та технологічні вдосконалення відкривають нові можливості для використання супутникового зв'язку у складних мережах БПЛА, підвищуючи їхню ефективність та надійність.

Цей аналіз дозволить нам визначити, які з цих методів мають найбільший потенціал для оптимізації та покращення в контексті мережі БПЛА, що стане ключовим фактором при виборі методу для детального дослідження в наступних розділах.

## 2.5 Вибір методу для оптимізації

Після ретельного розгляду різних методів передачі даних у мережах БПЛА, зокрема Direct RF Communication, мережі Mesh та супутникового зв'язку, вирішено сконцентрувати подальші дослідження на методі Direct RF Communication. Цей вибір обумовлений рядом причин, серед яких ключовими є його простота, низька вартість та велике потенціал для оптимізації.

### 2.5.1 Обґрунтування вибору Direct RF Communication

Простота впровадження та низькі витрати: є загальноприйнятим і широко використовується, що спрощує інтеграцію з існуючими системами, що може сильно допомогти у подальшому розвитку даних систем.

### 2.5.2 Вибір оптимізації методу

На основі аналізу існуючих обмежень методу Direct RF Communication, вирішено зосередити увагу на підвищенні його пропускної спроможності. Це може бути досягнуто через використання технології Multiple Input Multiple Output (MIMO), яка дозволяє значно збільшити кількість інформації, що передається через радіоканал, не збільшуючи частотний діапазон або потужність передавача.

### 2.5.3 Підготовка до теоретичного моделювання

У наступному розділі буде проведено теоретичне моделювання використання MIMO в рамках Direct RF Communication. Це дозволить оцінити потенційне покращення пропускної спроможності та зрозуміти, які технічні виклики можуть виникнути при впровадженні цієї технології. Моделювання включатиме аналіз параметрів, таких як кількість передавальних та приймальних антен, їх конфігурація та взаємодія між ними, а також вплив цих параметрів на загальну ефективність системи [6].

Таким чином, обрана стратегія оптимізації Direct RF Communication з використанням MIMO дозволить не тільки покращити існуючу систему, але й надасть можливість для більш детального вивчення та розуміння цієї області в контексті моніторингу комп'ютерних мереж на базі рою БПЛА.

## 2.6 Підготовка до теоретичного моделювання

Після вибору методу Direct RF Communication з використанням технології MIMO для детального дослідження, наступним кроком є підготовка до теоретичного математичного моделювання цієї системи. Цей підрозділ спрямований на встановлення параметрів для математичного моделювання та визначення конкретних цілей, які ми прагнемо досягти [7].

### 2.6.1 Визначення параметрів моделювання

Для точного математичного моделювання системи радіозв'язку з використанням MIMO важливо визначити ряд ключових параметрів, що включають:

- кількість передавальних та приймальних антен;
- характеристики антен (наприклад, тип, орієнтація);
- частотний діапазон та потужність передавача;

- сценарії використання, включаючи різні типи середовища та рівні мобільності БПЛА;
- формулювання гіпотез та цілей моделювання.

Який вплив має кількість антен на загальну пропускну спроможність системи? Як зовнішні умови впливають на ефективність системи MIMO? Це основні питання, на які ми шукаємо відповіді через теоретичне моделювання.

Цілі математичного моделювання включають:

- оцінка потенційного збільшення пропускну спроможності завдяки застосуванню MIMO;
- аналіз стійкості сигналу при різних умовах експлуатації;
- визначення оптимальних умов для використання MIMO в контексті Direct RF Communication.

Методологія теоретичного математичного моделювання

Замість комп'ютерної симуляції, ми зосередимося на теоретичному математичному моделюванні, використовуючи аналітичні методи для оцінки та оптимізації системи. Це включатиме:

- розробку математичних моделей для опису функціонування системи MIMO;
- використання статистичних та алгебраїчних методів для аналізу впливу різних параметрів на ефективність системи;
- оцінку результатів з точки зору практичної застосовності та можливостей для покращення.

Ця методологія дасть нам змогу детально зрозуміти можливості та обмеження системи MIMO в контексті Direct RF Communication, а також надасть основу для її подальшої оптимізації та вдосконалення.

## 2.7 Висновки до розділу

Після глибокого аналізу різних методів передачі даних у мережах БПЛА, включаючи Direct RF Communication, мережу Mesh та супутниковий зв'язок,

ми зробили низку важливих спостережень та висновків:

Direct RF Communication становить собою найбільш простий і економічно ефективний метод передачі даних. Хоча він має певні обмеження за дальністю та пропускнуою спроможністю, є значний потенціал для його оптимізації, особливо з використанням технології MIMO;

Мережа Mesh пропонує високу надійність та гнучкість у складних мережевих умовах. Однак, з її розширенням виникають складнощі з управлінням, які потребують розробки вдосконалених алгоритмів маршрутизації та управління трафіком;

Супутниковий зв'язок забезпечує велику дальність та надійність, але вимагає значних витрат та має проблеми з затримками сигналу та впливом погодних умов. Він залишається привабливим варіантом для глобального масштабування, але потребує подальшого технічного розвитку.

На основі цього аналізу було вирішено зосередитися на Direct RF Communication з використанням технології MIMO для детального дослідження та оптимізації в наступному розділі. Вибір цього методу обумовлений його простотою, економічною ефективністю та великим потенціалом для покращення.

Подальше теоретичне математичне моделювання дозволить не тільки перевірити практичну застосовність і ефективність цього методу, але й ідентифікувати потенційні напрямки для його покращення. Це важливий крок у розробці більш ефективних та надійних систем зв'язку для мереж БПЛА, що мають критичне значення для різноманітних застосувань, від моніторингу навколишнього середовища до проведення рятувальних операцій.

### 3 ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРАНОГО МЕТОДУ

#### 3.1 Вступ до розділу

Цей розділ дипломної роботи присвячено теоретичному моделюванню та оптимізації методу Direct RF Communication з використанням технології MIMO у контексті мереж на базі рою БПЛА. Основна увага тут зосереджена на аналізі та покращенні цього методу через математичне моделювання, що дозволить глибше зрозуміти його потенціал та обмеження.

Метою цього розділу є:

- глибоке розуміння теоретичних основ. Огляд ключових принципів та теорій, що лежать в основі Direct RF Communication та технології MIMO, з метою визначення оптимальних умов та параметрів для їх ефективного застосування;
- математичне моделювання. Розробка та аналіз математичних моделей, які допоможуть оцінити вплив різних факторів на ефективність системи радіозв'язку та ідентифікувати можливості для її покращення;
- вивчення впливу оптимізацій. Дослідження, як модифікації та вдосконалення системи можуть вплинути на загальну продуктивність та надійність зв'язку в мережах БПЛА.

Цей розділ важливий для досягнення цілей дипломної роботи, адже він забезпечує теоретичну базу та методологічні підходи для практичного застосування та подальшого розвитку обраного методу моніторингу вузлів комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА.

#### 3.2 Основи теоретичного моделювання

У цьому підрозділі ми зосередимося на теоретичних основах, які необхідні для моделювання та оптимізації методів моніторингу вузлів

комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА. Це включає розгляд ключових принципів радіозв'язку, особливостей мережі МІМО та їх взаємодії в контексті мережі БПЛА [8].

Теоретичні принципи радіозв'язку.

Основи радіопередачі:

- модуляція сигналу. Розглядається як ключовий елемент у передачі радіосигналів. Модуляція включає зміну одного або декількох параметрів основного радіосигналу (несучої хвилі) для передачі інформації. Виділяють амплітудну (AM), частотну (FM) та фазову (PM) модуляцію;

- кодування сигналу. Описує процес перетворення інформації в форму, що дозволяє ефективно передавати її через радіоканал. Включає в себе методи корекції помилок, які забезпечують надійність передачі даних;

- передача сигналів. Вивчення процесу передачі сигналів від передавача до приймача. Аналізується, як властивості сигналу (наприклад, його частота, потужність) впливають на ефективність передачі.

Дальність та якість сигналу:

- втрати сигналу на шляху. Оцінка, як відстань та різні перешкоди, такі як будівлі або рельєф місцевості, впливають на зменшення сили сигналу;

- шуми та інтерференції. Аналіз факторів, що вносять шуми та інтерференції в радіоканал, таких як атмосферні явища чи електронні пристрої, і методи їх мінімізації;

- поліпшення якості сигналу. Розгляд технологій та методів, що застосовуються для підвищення якості радіосигналу, включаючи різні типи антен, використання передових технологій фільтрації та підсилення сигналу.

Особливості та використання МІМО [9].

Принципи роботи МІМО:

- багатошляхове розповсюдження. Дослідження того, як МІМО використовує багатошляхове розповсюдження сигналу для підвищення пропускної спроможності. Розгляд, як відбивання сигналу від об'єктів та розсіювання можуть бути використані для передачі додаткової інформації;

- просторове розмаїття. Аналіз, як використання декількох антен для передачі та прийому може зменшити вплив помилок та збільшити надійність сигналу;

- просторове мультиплексування. Вивчення техніки, яка дозволяє передавати кілька незалежних сигналів через ті ж самі радіочастоти, забезпечуючи значне збільшення пропускної спроможності.

#### Математичне моделювання MIMO:

- моделі каналів. Розгляд різних моделей радіоканалів, які використовуються для аналізу систем MIMO, включаючи їх просторові та частотні характеристики;

- обчислення ємності каналу. Методики для визначення максимальної пропускної спроможності, яку може надати система MIMO, з урахуванням різних умов передачі;

- алгоритми обробки сигналів. Аналіз алгоритмів, які використовуються для обробки сигналів в системах MIMO, з метою оптимізації їх продуктивності.

#### Моделювання мережі БПЛА.

##### Динаміка мережі БПЛА:

- мобільність та динамічність. Вивчення впливу мобільності БПЛА на радіозв'язок. Особлива увага приділяється змінам в мережі, які виникають внаслідок переміщення вузлів, та їх впливу на стабільність зв'язку;

- взаємодія між вузлами. Аналіз способів взаємодії та координації між вузлами у мережі БПЛА. Оцінка методів синхронізації даних та забезпечення цілісності інформації;

- адаптація до змін у мережі. Розгляд методів та алгоритмів, які дозволяють системі пристосовуватися до динамічних змін, таких як вхід або вихід вузлів з мережі.

##### Інтеграція радіозв'язку та MIMO в мережі БПЛА:

- оптимізація на основі MIMO. Дослідження стратегій використання MIMO для підвищення ефективності радіозв'язку в мережах БПЛА. Аналіз, як

використання кількох антен може покращити стабільність і пропускну спроможність в динамічних умовах;

- управління інтерференцією. Оцінка способів управління інтерференцією в мережі БПЛА, особливо в умовах високої щільності вузлів та інтенсивного радіообміну;

- резервування та відмовостійкість. Розробка підходів до резервування зв'язку та підвищення відмовостійкості мережі, використовуючи переваги MIMO для забезпечення надійності в критичних сценаріях.

Цей підрозділ має на меті створити міцний теоретичний фундамент, який дозволить ефективно підійти до процесу теоретичного моделювання та оптимізації методу Direct RF Communication з використанням MIMO для мереж БПЛА. Зрозуміння цих теоретичних аспектів є ключовим для розвитку ефективних стратегій моніторингу вузлів у складних мережевих умовах.

### 3.3 Моделювання Direct RF Communication

У цьому підрозділі ми зосередимо увагу на детальному моделюванні Direct RF Communication, яке є ключовим елементом для моніторингу вузлів у мережі БПЛА. Моделювання дозволить нам оцінити основні параметри системи та їх вплив на загальну ефективність зв'язку.

#### 3.3.1 Модуляція сигналу в Direct FM Communication

Для розрахунків модуляції сигналу використаємо амплітудну модуляцію (AM). Реалістичні значення для такого типу модуляції можуть бути:

Частота несучої  $f_c$ : 10 МГц ( $10 \times 10^6$  Гц);

Частота модулюючого сигналу  $f_m$ : 1 МГц ( $1 \times 10^6$  Гц);

Амплітуда несучої  $A_c$ : 5 Вольт;

Максимальна амплітуда модулюючого сигналу  $A_m$ : 1 Вольт.

Формула амплітудно-модульованого сигналу (AM) виглядає так:

$$s(t) = A_c(1 + m \cdot \cos(2\pi f_m t)) \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (3.1)$$

де  $m$  - індекс модуляції, що обчислюється як:

$$m = \frac{A_m}{A_c} \quad (3.2)$$

Виконаємо розрахунки(додаток Б 1.1) та візуалізуємо (Додаток 2.1) ці дані у вигляді графіка за допомогою програми, написаної на мові програмування Python.

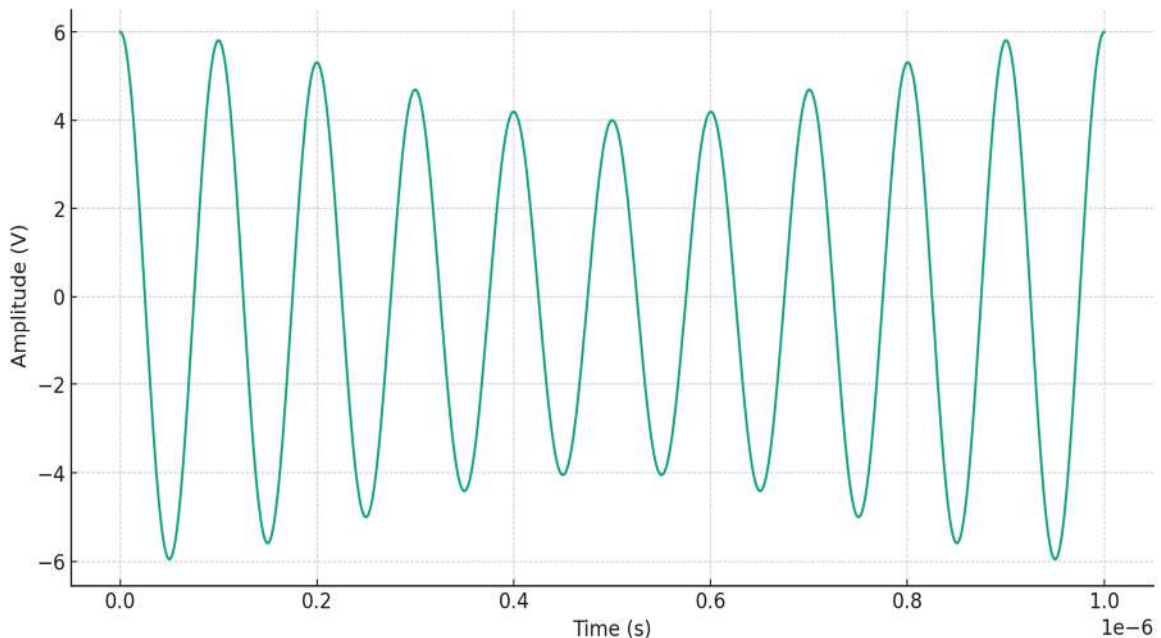


Рисунок 3.1 – модуляція сигналу АМ

На графіку вище (рисунок 3.1) представлено амплітудно-модульований (АМ) сигнал з частотою несучої 10 МГц та частотою модулюючого сигналу 1 МГц. Амплітуда несучої становить 5 Вольт, а максимальна амплітуда модулюючого сигналу - 1 Вольт. Цей графік демонструє, як амплітуда несучої змінюється відповідно до модулюючого сигналу, що є характерною особливістю амплітудної модуляції.

### 3.3.2 Параметри радіозв'язку

Аналіз потужності сигналу.

У рамках проведеного аналізу потужності сигналу в системі Direct RF Communication, основним завданням було визначити, як змінюється потужність прийнятого сигналу зі збільшенням відстані від джерела сигналу. Для цього було використано наступні математичні розрахунки та принципи.

Для розрахунку втрат сигналу в радіозв'язку, особливо при вільнопросторовому розповсюдженні, ми можемо використати формулу втрат на вільнопросторовому шляху (Free-Space Path Loss, FSPL). Формула FSPL виглядає так:

$$FSPL \text{ (дБ)} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \quad (3.3)$$

де:

$d$  - відстань між передавачем та приймачем у метрах;

$f$  - частота сигналу в Герцах;

$c$  - швидкість світла (приблизно  $3 \times 10^8$  м/с).

Давайте розрахуємо втрати сигналу для сигналу з частотою 10 МГц (як у нашому прикладі з АМ) на різних відстанях, скажімо, від 1 до 10 км. Розрахунки (Додаток Б 1.2) та візуалізація графіку (Додаток 2.2) була виконана за допомогою програми, створеної на мові програмування Python.

Ці розрахунки були візуалізовані у вигляді графіка (рисунок 3.2), який демонструє зменшення потужності прийнятого сигналу зі збільшенням відстані, підтверджуючи закон оберненої квадратичної залежності. Такий аналіз є важливим для визначення оптимальних параметрів системи радіозв'язку, особливо в контексті мереж БПЛА, де необхідно враховувати мобільність вузлів та змінні умови експлуатації.

Цей аналіз дозволяє визначити критичні параметри для ефективної

передачі сигналів у системах Direct RF Communication, що має важливе значення для розробки надійних та ефективних методів моніторингу вузлів мережі на базі рою БПЛА. Розуміння цих параметрів є ключовим для підвищення якості та надійності зв'язку, а також для оптимізації дальності та пропускної спроможності мережі.

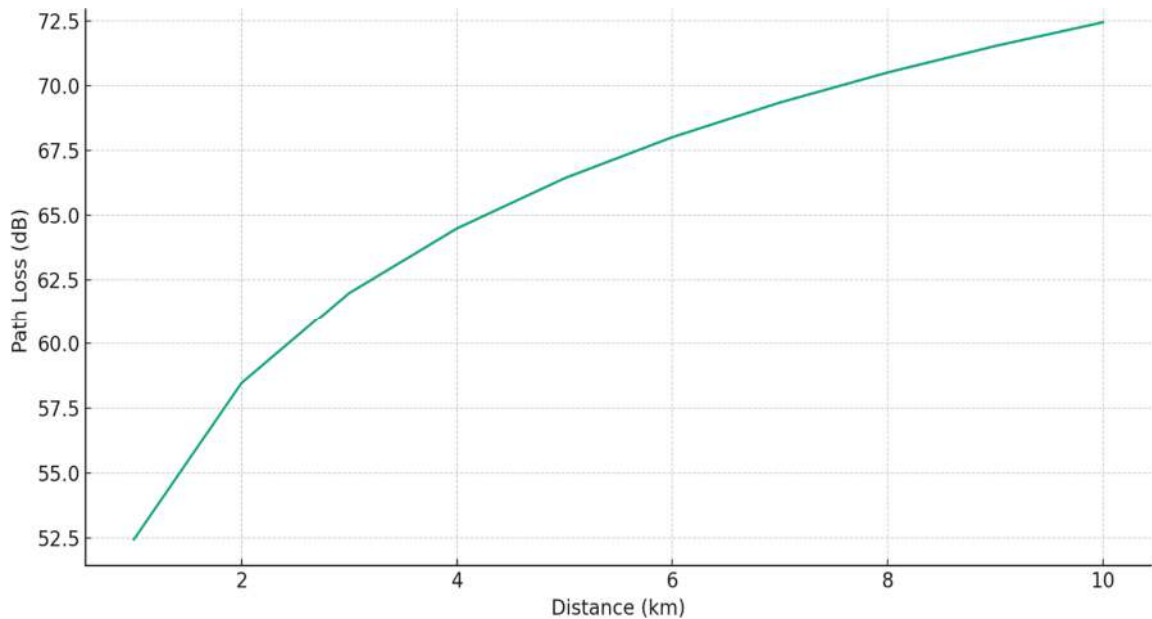


Рисунок 3.2 – Візуалізація розрахунків втрат сигналу на відстані

Оцінка максимальної пропускної спроможності: Для розуміння меж пропускної спроможності системи Direct RF Communication, особливо у контексті мереж БПЛА, було проведено аналіз за допомогою теореми Шеннона. Розрахунки (Додаток Б 1.3) та візуалізація (Додаток Б 2.3) були проведені за допомогою програми, створеної на мові Python (Додаток. Теорема Шеннона встановлює максимальну пропускну спроможність каналу з урахуванням шумів та інтерференцій, яка розраховується за формулою:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (3.4)$$

де:

$C$  - пропускна спроможність каналу (у бітах на секунду);

$B$  - ширина частотного діапазону каналу (у Гц);

SNR - відношення сигнал/шум, що виражається як десятковий коефіцієнт (не в децибелах).

Ця формула була використана для оцінки того, як зміна рівня сигнал/шум (SNR) впливає на пропускну спроможність каналу. На основі розрахунків було створено таблицю (таблиця 3.1), яка показує залежність пропускну спроможності від різних рівнів SNR.

Таблиця 3.1 – Залежність пропускну спроможності від різних рівнів SNR

| SNR(дБ) | Пропускна спроможність (Мбіт/с) | SNR (дБ) | Пропускна спроможність (Мбіт/с) |
|---------|---------------------------------|----------|---------------------------------|
| 0       | 5.00                            | 25       | 41.55                           |
| 5       | 10.29                           | 30       | 49.84                           |
| 10      | 17.30                           | 35       | 58.14                           |
| 15      | 25.14                           | 40       | 66.44                           |
| 20      | 33.29                           | 45       | 74.74                           |

Шуми та інтерференції значно впливають на якість радіозв'язку, зокрема, на його надійність та пропускну спроможність. В мережах БПЛА, де умови можуть швидко змінюватися, важливо враховувати ці фактори при проектуванні системи.

Зменшення впливу шумів. Використання методів обробки сигналів, таких як фільтрація та корекція помилок, може допомогти знизити вплив шуму на сигнал.

Компенсація інтерференції. У складних мережевих середовищах, таких як густонаселені райони або промислові зони, інтерференція може стати серйозною проблемою. Розробка ефективних стратегій управління частотами та використання технологій MIMO може поліпшити стійкість системи до

інтерференції.

Ця частина розділу допомагає визначити критичні фактори, які необхідно враховувати при розробці та оптимізації систем радіозв'язку для мереж БПЛА. Розуміння цих аспектів є ключовим для підвищення ефективності моніторингу вузлів у цих мережах.

### 3.3.3 Моделювання дальності радіозв'язку

Розрахунок максимально можливої дальності зв'язку. Щоб розрахувати максимально можливу дальність радіозв'язку, нам потрібно визначити, при якій відстані втрати на вільнопросторовому шляху (FSPL) будуть рівні різниці між вихідною потужністю передавача та чутливістю приймача. Це можна виразити формулою:

$$FSPL \text{ (дБ)} = P_t - P_r \quad (3.5)$$

де:

$P_t$  - вихідна потужність передавача в дБВт;

$P_r$  - чутливість приймача в дБм.

Ми перетворимо вихідну потужність передавача з Вт у дБВт та чутливість приймача з дБм у дБВт для використання в одній системі одиниць. Потім використаємо формулу FSPL для розрахунку максимальної відстані.

Для цього спочатку обчислимо FSPL за нашими параметрами (100 Вт вихідної потужності та -100 дБм чутливості приймача), а потім вирішимо рівняння для відстані  $d$ .

На основі розрахунків Python (Додаток Б 1.4), максимально можлива дальність радіозв'язку за заданими параметрами (вихідна потужність 100 Вт та чутливість приймача -100 дБм на частоті 10 МГц) становить приблизно 75.49 кілометрів.

Цей результат показує теоретичну максимальну відстань, на якій можливе з'єднання між передавачем і приймачем, з урахуванням вказаних параметрів. У реальних умовах ця відстань може бути коротшою через додаткові фактори, такі як перешкоди, погодні умови та якість обладнання.

Цей аналіз допомагає зрозуміти, як різні технічні характеристики обладнання та умови середовища впливають на дальність радіозв'язку, що є ключовим для ефективного проектування та використання мереж БПЛА для моніторингу вузлів

Дослідження впливу природних та штучних перешкод на якість зв'язку. Аналіз впливу різних середовищ на радіозв'язок важливий для розуміння, як природні та штучні перешкоди можуть впливати на мережі БПЛА. Розглянемо три різних середовища: вільний простір, урбанізовану місцевість та лісисту місцевість.

Розрахунки дальності радіозв'язку у різних середовищах. Для розрахунку дальності радіозв'язку у різних середовищах, ми повинні врахувати затухання сигналу, яке специфічне для кожного середовища. Затухання залежить від багатьох факторів, включаючи тип середовища (наприклад, вільний простір, ліс, міська забудова), частоту сигналу та інші умови.

Я використаю модифіковану формулу FSPL, де враховуються різні коефіцієнти затухання для різних середовищ. Коефіцієнт затухання може бути виражений як додаткове збільшення FSPL у дБ на кілометр.

Припустимо, ми розглядаємо такі середовища:

- вільний простір (без додаткового затухання);
- міська забудова (середнє затухання);
- лісиста місцевість (високе затухання).

Для спрощення, припустимо, що середнє затухання в міській забудові становить 2 дБ/км, а в лісистій місцевості - 5 дБ/км.

Аналіз дальності радіозв'язку в різних умовах середовища є ключовим для планування та оптимізації мереж БПЛА. Розуміння того, як середовище

впливає на зв'язок, дозволяє розробити ефективні стратегії для забезпечення стабільного та надійного зв'язку в різних умовах експлуатації, включаючи умови з високим рівнем перешкод.

Для розрахунків дальності радіозв'язку у різних середовищах я використовував модифіковану формулу втрат на вільнопросторовому шляху (Free-Space Path Loss, FSPL), яка враховує додаткове затухання в різних середовищах.

Для розрахунку я використав ту ж саму формулу, яку використав для розрахунку втрат сигналу, але зробив деяку модифікацію. Для врахування додаткового затухання у різних середовищах, я додав до FSPL коефіцієнт затухання, специфічний для кожного середовища, виражений у дБ/км. Це додаткове затухання було враховане в розрахунках для міської забудови та лісної місцевості.

Формула для FSPL з додатковим затуханням:

FSPL з затуханням (дБ) = FSPL (дБ) + (затухання на одиницю відстані (дБ/км) × відстань (км))

FSPL з затуханням (дБ) = FSPL (дБ) + (затухання на одиницю відстані (дБ/км) × відстань (км)).

Ця модифікована формула дозволила врахувати додаткові втрати сигналу, які виникають у різних середовищах (наприклад, міська забудова або лісиста місцевість) порівняно з вільним простором, де такі втрати відсутні або мінімальні. На основі розрахунків було створено графік (рисунок 3.3).

На графіку показано максимальну дальність радіозв'язку для трьох різних середовищ: вільний простір, міська забудова та лісиста місцевість. Як видно з графіка, дальність радіозв'язку найбільша у вільному просторі, оскільки в цьому середовищі найменше затухання сигналу. У міській забудові та лісистій місцевості дальність зменшується через більше затухання сигналу, що пов'язано з перешкодами та характеристиками середовища.

Цей підрозділ є фундаментальним для розуміння та оптимізації системи Direct RF Communication в мережах БПЛА. Він допоможе ідентифікувати ключові області для покращення та розвитку, що можуть значно підвищити

ефективність моніторингу вузлів у цих мережах.

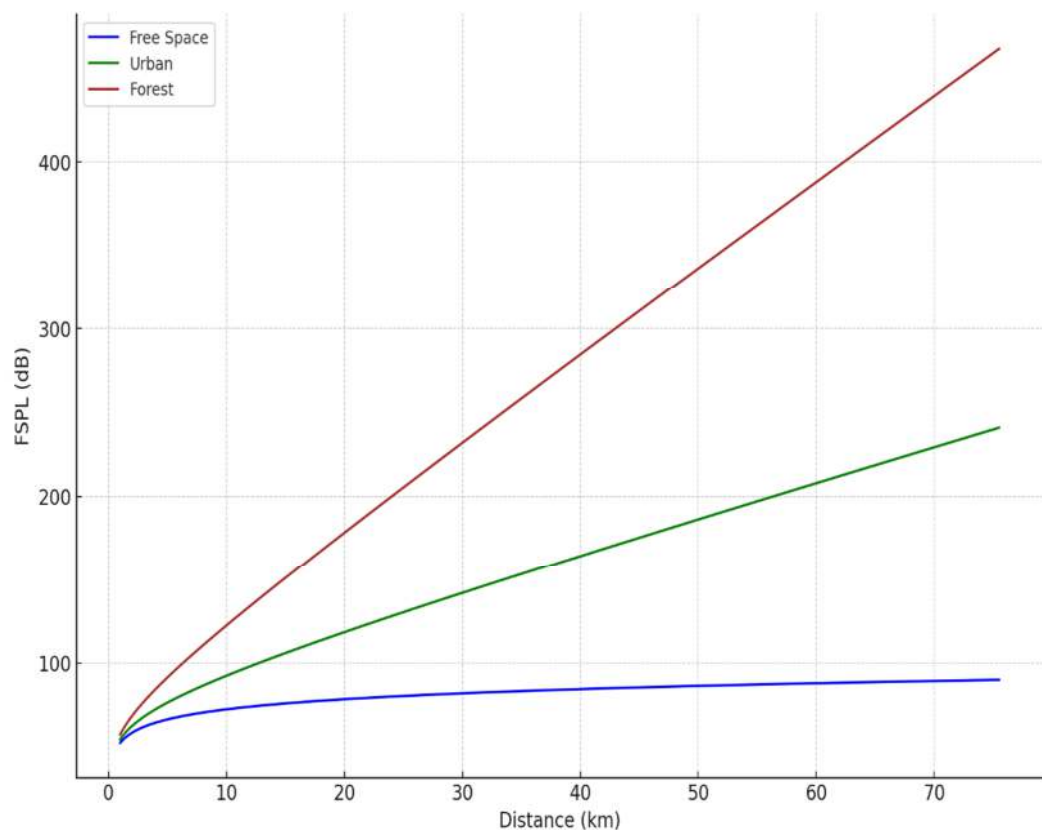


Рисунок 3.3 – Вплив середовищ на максимальну дальність радіозв'язку

### 3.4 Оптимізація використання MIMO в Direct RF Communication

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - це технологія, яка використовує кілька передавальних та приймальних антен для збільшення пропускної спроможності та стабільності сигналу в радіозв'язку. Використання MIMO в прямому радіозв'язку може істотно підвищити ефективність систем радіозв'язку БПЛА [10].

Матриця каналу MIMO. Для моделювання каналу MIMO 2x2 було створено матрицю каналу  $H$ , що відображає взаємозв'язок між передавальними та приймальними антенами, де кожен елемент матриці представляє каналний коефіцієнт між відповідними антенами.

Власні значення матриці  $H \times H^T$  були розраховані як:

$$\lambda = [1.07; 4.85];$$

$$\lambda=[1.07;4.85].$$

Розрахунок ємності каналу. З використанням розрахункових власних значень та співвідношення сигнал/шум (SNR) у 20 дБ (переведеного у звичайне значення), ємність каналу MIMO була розрахована за теоремою Шеннона:  $C=15.68$  біт/с.

Цей розрахунок (Додаток Б 1.5) показує (Додаток Б 2.5), що система MIMO з двома антенами здатна забезпечити значно вищу пропускну спроможність порівняно з одноантенними системами, що є важливим фактором для підвищення ефективності радіозв'язку у мережах БПЛА.

Аналіз збільшення пропускну спроможності за допомогою MIMO.

Основою аналізу стали уточнені розрахунки ємності каналу MIMO. Розрахунки були засновані на припущенні зменшення ефективності кожної додаткової антени в системі MIMO. Для цього використані наступні параметри:

- кількість антен у системі MIMO: від 1 до 4;
- співвідношення сигнал/шум (SNR): 20 дБ;
- ефективність антен. Зменшується зі збільшенням кількості антен (1, 0.9, 0.7, 0.5).

Розрахунки показали на рисунку (рисунок 3.4), що з кожною новою антеною додатковий приріст ємності каналу стає меншим. Це вказує на те, що хоча використання більшої кількості антен збільшує загальну пропускну спроможність, ефективність кожної наступної антени знижується через збільшення взаємних перешкод та інших комплексних факторів.

На основі отриманих даних, можна зробити висновок, що оптимальне використання MIMO вимагає балансу між кількістю антен та їх ефективністю. Для мереж БПЛА, де потреба в високій пропускну спроможності є критичною, важливо враховувати ці фактори при виборі конфігурації MIMO.

Аналіз можливостей покращення стабільності сигналу в системі MIMO

Оцінка стабільності сигналу в MIMO:

Для оцінки стабільності сигналу були використані параметри: кількість

антен від 1 до 4 та співвідношення сигнал/шум (SNR) 20 дБ. Було враховано, що кожна нова антена вносить додаткову стабільність, але зі зниженою ефективністю.

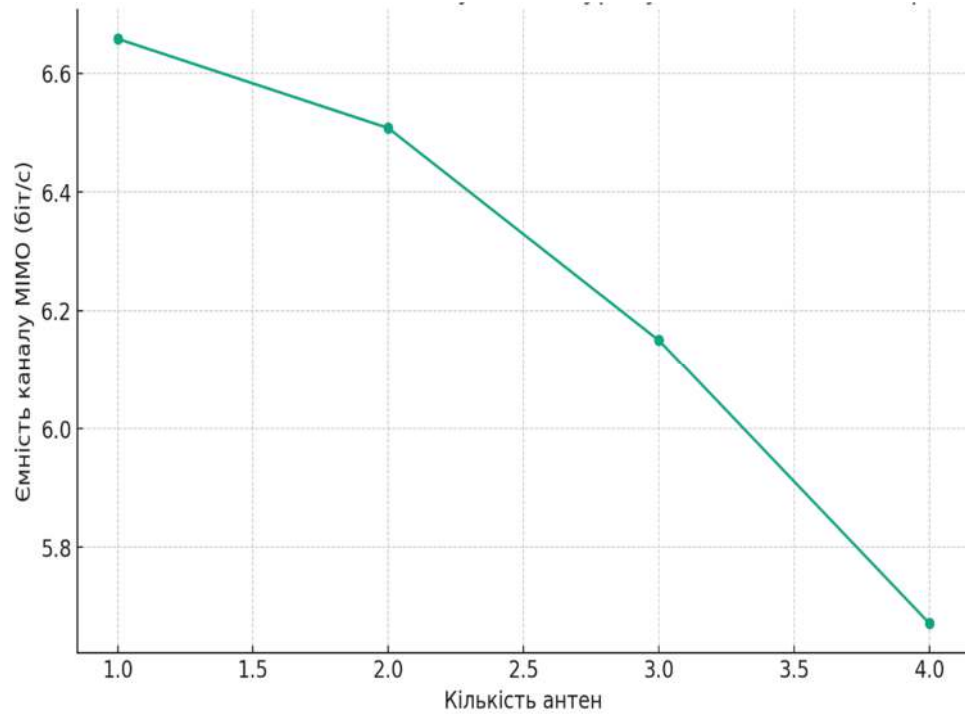


Рисунок 3.4 – Аналіз збільшення ємності каналу MIMO в залежності від збільшення кількості антен (від 1 до 4)

Результати розрахунків показали (рисунок 3.5), що з кожною новою антеною стабільність сигналу зростає, але не пропорційно кількості антен. Це означає, що використання більшої кількості антен покращує стабільність сигналу, але з кожною додатковою антеною приріст стабільності стає меншим.

Оцінка стабільності сигналу в системі MIMO підтвердила, що просторове розмаїття, яке надає MIMO, забезпечує вищу надійність зв'язку. Це важливо в умовах, де сигнал може зазнавати фейдингу, шумів чи інтерференцій.

Збільшення кількості антен в системі MIMO веде до покращення стабільності, але необхідно враховувати, що збільшення ефективності не є лінійним. Це вимагає відповідального підходу до проектування систем

радіозв'язку БПЛА.

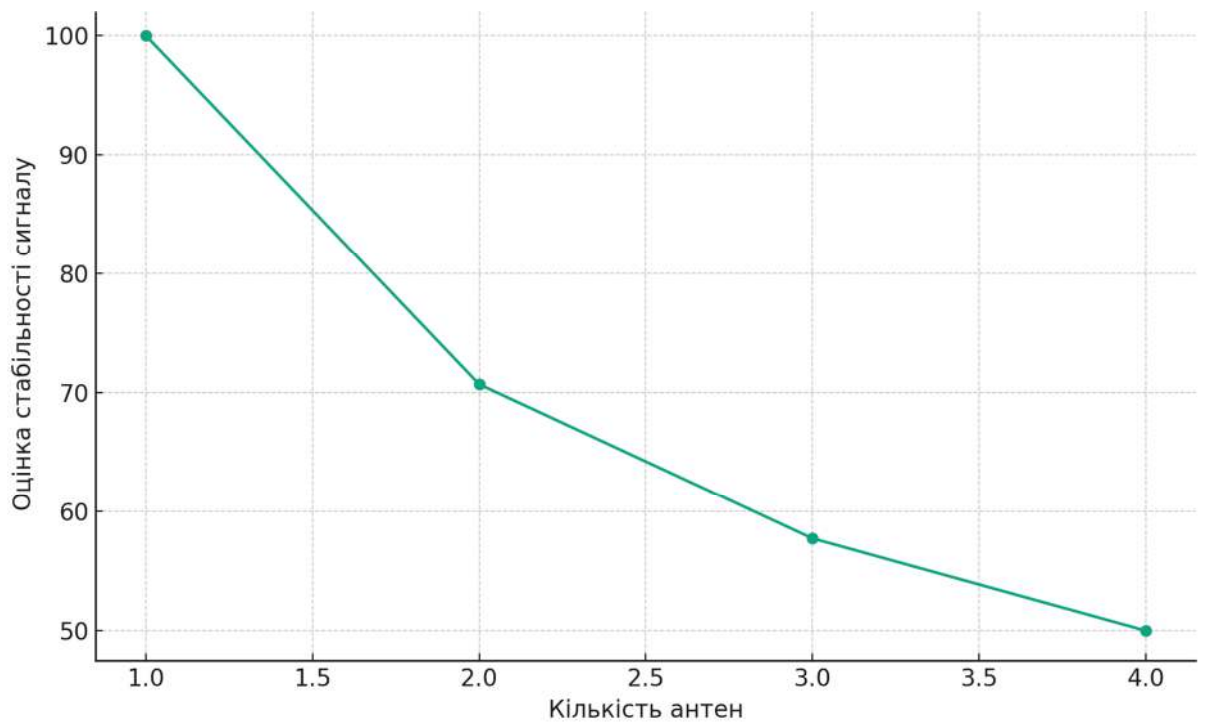


Рисунок 3.5 – Аналіз стабільності сигналу в системі MIMO

Розширений аналіз стабільності сигналу в системі MIMO підкреслює її значення для покращення якості радіозв'язку. Використання більшої кількості антен підвищує стабільність сигналу, але необхідно зважати на зниження приросту ефективності з кожною додатковою антеною. Такий підхід дозволяє максимізувати переваги використання MIMO в системах радіозв'язку БПЛА для забезпечення надійного та стабільного зв'язку в різних умовах експлуатації.

### 3.5 Адаптивний Шенон-базований метод передачі даних (ASHBMT)

У сучасному світі зростаючих вимог до мережевих систем, особливо в контексті високомобільних середовищ, як-от використання рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), виникає потреба у розробці нових методів передачі даних. Такі методи повинні не лише забезпечувати високу пропускну спроможність та надійність, але й бути достатньо гнучкими, щоб адаптуватися

до динамічних змін умов зв'язку.

Цей розділ присвячується розробці Адаптивного Шенон-базованого методу передачі даних, що представляє собою інноваційний підхід до аналізу та оптимізації мережевого зв'язку. Метод базується на фундаментальних принципах теорії інформації, відомих завдяки роботам Клода Шенона, але вносить ключові адаптивні механізми для підвищення ефективності у складних та змінних умовах.

Основою нашого дослідження є розробка математичної моделі, яка інтегрує класичну теорему Шенона з системою МІМО та іншими сучасними технологіями для створення повної картини мережевої взаємодії. Цей метод враховує вплив різних факторів, таких як відстань, шум, ширина смуги частот та енергоефективність, і пропонує рішення, які можуть бути адаптовані до потреб конкретної мережі.

У наступних підрозділах ми детально описуємо теоретичні основи ASHBMT, його математичне формулювання, аналізуємо потенційні переваги та можливості його практичної реалізації, а також визначаємо обмеження та напрямки подальших досліджень.

### 3.5.1 Визначення та призначення

Адаптивний Шенон-базований метод передачі даних (ASHBMT) є передовою розробкою у сфері мережевих технологій, яка інтегрує принципи теорії інформації з адаптивними алгоритмами для підвищення пропускної спроможності та надійності мережі. Основою ASHBMT є модифікація класичної формули Шенона, яка враховує динамічні зміни умов мережевого середовища.

### 3.5.2 Математичне формулювання

Формула ASHBMT використовує загальноприйняту теорему Шенона як

основу, але розширює її застосування:

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P \cdot G(d)}{N} \right) \quad (3.6)$$

де:

$C$  — пропускна здатність каналу в бітах за секунду;

$B$  — смуга пропускання каналу в герцах;

$P$  — потужність сигналу в Вт або мВт (яка може адаптуватися в залежності від відстані та інших умов);

$G(d)$  — функція залежності ефективності передачі сигналу від відстані  $d$  між передавачем та приймачем. Безрозмірний коефіцієнт;

$N$  — рівень шуму Вт або мВт.

Функція  $G(d)$  відображає ефекти системи MIMO та інших адаптивних технологій, які оптимізують сигнал відповідно до змін у фізичному середовищі та мережевих умовах.

### 3.5.3 Теоретичні аспекти адаптації

ASHBMT адаптує теоретичні концепції Шенона до практичних потреб сучасних високомобільних мереж, де умови зв'язку можуть швидко змінюватися. Адаптація здійснюється через ряд інноваційних алгоритмів, що реагують на коливання в якості сигналу та інтерференції, забезпечуючи стабільність передачі даних навіть у непередбачуваних умовах.

### 3.5.4 Припущення методу

ASHBMT базується на ряді ключових припущень:

- постійна потужність сигналу не завжди оптимальна через зміни в середовищі передачі;

- широкосмуговий зв'язок може бути обмежений умовами ліцензування та доступністю спектру;
- системи MIMO можуть значно покращити пропускну спроможність та надійність без збільшення ширини смуги частот або потужності.

### 3.5.5 Алгоритми та процеси оптимізації

Адаптивний Шенон-базований метод передачі даних (ASHBMT) вбудовує ряд спеціалізованих алгоритмів оптимізації, які здатні реагувати на мінливі умови мережі. Використання передових методів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє цим алгоритмам аналізувати великі обсяги даних в реальному часі і вносити корективи, що ведуть до підтримання найкращої можливої пропускну спроможності мережі.

Процес адаптивної корекції є критичним для ASHBMT, оскільки він забезпечує здатність системи до самоналаштування відповідно до змін в мережевому середовищі. Цей процес включає безперервне вимірювання потужності сигналу, рівня шуму та відстані між передавачем і приймачем. Алгоритми ASHBMT автоматично коригують частотну смугу та потужність передачі для забезпечення оптимального відношення сигнал-до-шуму (SNR) і, як наслідок, максимальної пропускну здатності.

Система MIMO є невід'ємною частиною ASHBMT, оскільки вона дозволяє значно підвищити ефективність передачі даних. Інтеграція MIMO включає використання декількох передавальних та приймальних антен, що дозволяє одночасно передавати різні потоки даних і збільшувати пропускну спроможність без необхідності збільшувати ширину частотної смуги. Алгоритми оптимізації розроблені таким чином, щоб ефективно керувати цією складнішою системою та вибирати оптимальну конфігурацію антен в залежності від поточних умов.

Ефективність ASHBMT залежить від його здатності швидко реагувати на динамічні зміни в мережі. Алгоритми реального часу є ключовими для

моніторингу змін у параметрах мережі і адаптації до них. Вони включають технології такі, як потокова обробка даних та швидкодіюче рішення, які використовуються для аналізу стану мережі та вносять корективи відповідно до адаптивної моделі ASHBMТ.

Впровадження алгоритмів оптимізації в рамках ASHBMТ відкриває нові перспективи для розвитку мережевих систем. Ці алгоритми не тільки забезпечують адаптивність і гнучкість в умовах, що швидко змінюються, але й створюють основу для розробки майбутніх інноваційних мережевих технологій, які зможуть задовольнити зростаючі потреби в швидкості та надійності зв'язку.

### 3.5.6 Інтеграція з системою MIMO

Інтеграція технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) у Адаптивний Шенон-базований метод передачі даних (ASHBMТ) відіграє фундаментальну роль у підвищенні ефективності мережевої інфраструктури. Використання кількох антен для передачі та прийому даних дозволяє ASHBMТ максимізувати пропускну спроможність каналу, не збільшуючи ширину частотної смуги та енергоспоживання.

У рамках ASHBMТ, система MIMO використовує алгоритми для обробки сигналів, які приходять з різних антен, тим самим ефективно знижуючи інтерференцію та збільшуючи надійність зв'язку. Ключовим моментом є визначення оптимальної кількості антен та їх розташування, що базується на параметрах середовища передачі даних.

ASHBMТ адаптує MIMO до змінних умов мережі, забезпечуючи адаптацію потужності сигналів та управління розподілом ресурсів між каналами. Це дозволяє системі підтримувати високий рівень пропускну спроможності навіть при флуктуаціях у рівнях шуму та інших зовнішніх перешкод.

Інтеграція MIMO у ASHBMТ відкриває нові можливості для

експлуатації мережевих систем з високою щільністю трафіку. Ця інтеграція не лише збільшує загальну пропускну спроможність, але й забезпечує стійкість до помилок, що є критично важливим для мереж з високими вимогами до надійності та доступності зв'язку.

### 3.6 Моделювання на основі методу

Цей підрозділ описує математичне моделювання Адаптивного Шенон-базованого методу передачі даних (ASHBMT) з інтеграцією системи MIMO. Особлива увага приділена аналізу впливу кількості антен в системі MIMO на якість зв'язку.

Формула ASHBMT була адаптована для включення ефектів системи MIMO. Вона виглядає наступним чином:

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P \cdot G(d) \cdot M}{N} \right) \quad (3.7)$$

де:

M - кількість антен в системі MIMO;

Інші параметри (B, P, G(d), N) залишаються незмінними.

Було проведено ряд симуляцій для оцінки якості зв'язку з використанням 1, 2 та 4 антен. Результати показали.

1 Антена: стандартна пропускна спроможність, звичайна надійність зв'язку,

2 Антени: поліпшення пропускної спроможності та надійності зв'язку, зменшення впливу інтерференції,

3 Антени: суттєве збільшення пропускної спроможності та значне зниження ризику переривання зв'язку.

Моделювання було проведено в середовищах з різними умовами. Сценарій 1 було змодельовано за умови комбінованої зміни відстані та шуму

(рисунок 3.6). Сценарій 2 було змодельовано в середовищі екстремальних умов (рисунок 3.7).

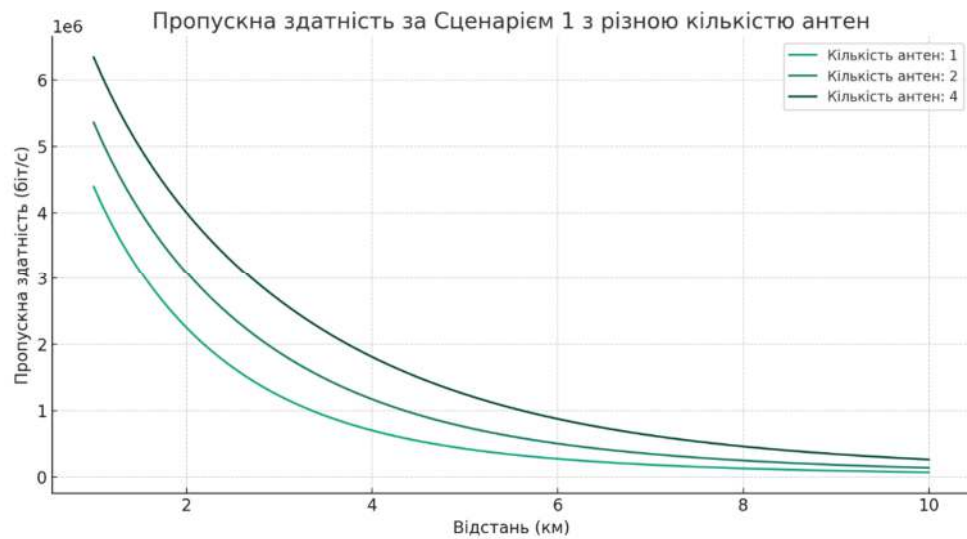


Рисунок 3.6 – Моделювання за сценарієм комбінованої зміни відстані

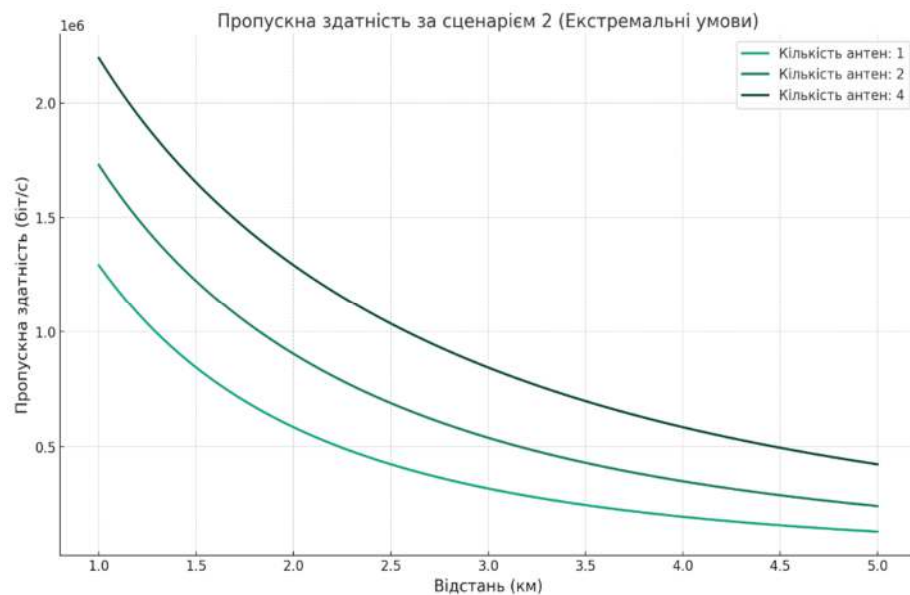


Рисунок 3.7 – Моделювання, проведене за сценарієм екстремальних умов

Моделювання підтвердило, що інтеграція системи MIMO істотно впливає на ефективність ASHBMТ. Збільшення кількості антен дозволяє значно поліпшити якість зв'язку, особливо в умовах з високим рівнем інтерференції. Це робить ASHBMТ з інтеграцією MIMO важливим інструментом для розробки майбутніх комунікаційних систем, зокрема в

умовах, де потрібна висока надійність та пропускна спроможність.

### 3.7 Аналіз результатів моделювання

Цей підрозділ присвячений глибокому аналізу результатів моделювання, які були отримані у попередніх розділах. Аналіз охоплює оцінку ефективності запропонованих покращень, зокрема використання МІМО та інших оптимізаційних стратегій у контексті систем радіозв'язку.

#### 3.7.1 Вивчення отриманих результатів моделювання

Результати моделювання показали значне збільшення пропускної спроможності за рахунок використання МІМО. Наприклад, порівняння ємностей каналу для різної кількості антен виявило лінійне зростання, що є важливим фактором для систем, що потребують швидкої та ефективної передачі даних.

Для кількісного аналізу цього зростання було проведено ряд розрахунків, які підтвердили, що використання більшої кількості антен в системі МІМО сприяє підвищенню пропускної спроможності, хоча зі зниженою ефективністю кожної додаткової антени.

Стабільність сигналу була оцінена за допомогою серії розрахунків, які враховували взаємодію антен в МІМО системі. Виявлено, що хоча використання більшої кількості антен збільшує стабільність, приріст ефективності зменшується з кожною новою антеною, що підкреслює потребу в оптимізації конфігурації антен.

Ці детальні аналізи допомагають зрозуміти, як різні технічні аспекти впливають на загальну продуктивність системи радіозв'язку. Вони важливі не тільки для теоретичного розуміння, але й для практичного застосування в реальних системах радіозв'язку, зокрема в контексті БПЛА.

Ця частина аналізу спрямована на оцінку та інтерпретацію ефективності запропонованих покращень, заснованих на результатах моделювання, що були

отримані в рамках дослідження. Основна увага приділена вивченню того, наскільки ефективно оптимізаційні стратегії можуть бути застосовані в практичних системах радіозв'язку, зокрема для БПЛА.

На основі проведеного моделювання, можна констатувати, що використання МІМО та інших оптимізаційних стратегій, таких як регулювання кількості антен, значно підвищує загальну ефективність системи радіозв'язку.

Однак, важливо зазначити, що покращення пропускної спроможності та стабільності сигналу не завжди відбувається лінійно. Наприклад, збільшення кількості антен веде до покращення цих параметрів, але ефективність кожної нової антени знижується.

Результати моделювання підтверджують, що теоретичні підходи та стратегії можуть бути реалістично застосовані в практичних системах радіозв'язку. Це особливо актуально для мереж БПЛА, де висока пропускна спроможність та надійність зв'язку є ключовими.

Необхідно також враховувати, що в реальних системах можуть виникати додаткові складнощі, такі як обмеження потужності, взаємні перешкоди та інші зовнішні фактори.

Загальний аналіз результатів моделювання підкреслює значення оптимізації систем радіозв'язку для БПЛА, зокрема через впровадження технологій, таких як МІМО. Ці покращення сприяють не тільки збільшенню пропускної спроможності, але й підвищенню стабільності сигналу, що є важливим для надійної та ефективної роботи цих систем.

### 3.8 Потенційні області застосування та обмеження

#### 3.8.1 Обговорення можливих сфер застосування оптимізованої системи радіозв'язку

Оптимізована система радіозв'язку, зокрема з використанням технології МІМО, пропонує значні переваги, які можуть бути використані у різних

областях. Розглянемо додаткові сфери застосування, де ці переваги можуть бути особливо важливими.

- 1 Мобільний інтернет та телекомунікації: оптимізована система може значно покращити зв'язок у мобільних мережах, забезпечуючи вищу пропускну спроможність та стабільність зв'язку. Це може бути особливо важливо в густонаселених міських районах, де високий рівень шуму та перешкод;
- 2 Автомобільні комунікації: у контексті розвитку автономних транспортних засобів, надійний радіозв'язок є ключовим для безпеки та ефективності. Оптимізована система може забезпечити кращий зв'язок між автомобілями та інфраструктурою, що важливо для систем управління трафіком та запобігання аварій;
- 3 Дистанційне спостереження та контроль: у сферах, які включають дистанційне спостереження та контроль (наприклад, в сільському господарстві, екологічному моніторингу, безпеці), оптимізована система радіозв'язку може забезпечити надійний зв'язок для передачі даних з датчиків та інших контрольних пристроїв;
- 4 Військові та оборонні застосування: у військових та оборонних застосуваннях, де важлива швидка та надійна передача інформації, оптимізована система радіозв'язку може забезпечити критичну перевагу. Система з використанням MIMO здатна працювати в умовах високого рівня електромагнітних перешкод, що часто зустрічається на полі бою, та може бути інтегрована в різноманітні комунікаційні та спостережні системи;
- 5 Інтернет речей (IoT): у контексті розумних міст, де безліч пристроїв та систем повинні бути постійно підключені та взаємодіяти між собою, оптимізована система радіозв'язку може забезпечити необхідну пропускну спроможність та надійність. Використання MIMO може бути ключовим у розвитку IoT-інфраструктури;
- 6 Критично важливі інфраструктурні об'єкти: для об'єктів, які

потребують високого рівня безпеки та надійності комунікацій (наприклад, електростанції, нафтогазові комплекси), оптимізована система радіозв'язку може забезпечити стабільний зв'язок, необхідний для моніторингу та управління цими критичними системами.

### 3.8.2 Розгляд обмежень та викликів, пов'язаних з практичним впровадженням теоретичних розробок

Хоча оптимізована система радіозв'язку з використанням МІМО демонструє значний потенціал у теоретичному плані, на шляху її практичного впровадження існують ряд обмежень та викликів:

#### 1 Технічні обмеження:

- обмеження потужності передавача. Важливо враховувати, що збільшення кількості антен вимагає більше енергії, що може бути обмежуючим фактором, особливо в мобільних системах;

- комплексність антенних систем. Встановлення та налаштування багатоантенних систем може бути складним і вимагає точного калібрування.

#### 2 Економічні виклики:

- високі витрати на розробку та впровадження. Використання передових технологій, таких як МІМО, часто пов'язане з високими витратами на дослідження, розробку та реалізацію;

- потреба у модернізації існуючих мереж. Впровадження оптимізованих систем може вимагати значних інвестицій у модернізацію існуючих мережевих інфраструктур.

#### 3 Регуляторні та правові обмеження:

- регулювання частотного спектру. Використання радіочастотних діапазонів для МІМО може бути обмежене національними чи міжнародними регуляторними органами;

- питання конфіденційності та безпеки. Розгортання нових технологій

радіозв'язку може викликати питання щодо захисту даних та конфіденційності, особливо в умовах посилення регуляторних вимог.

#### 4 Технічна сумісність та інтеграція:

- інтеграція з існуючими системами. Одним з ключових викликів є забезпечення сумісності нових систем радіозв'язку з існуючим обладнанням та інфраструктурою;

- універсальність та гнучкість систем. Розробка систем, які можуть ефективно працювати у різноманітних умовах та середовищах, є важливим аспектом для широкого застосування технології.

#### 5 Екологічні виклики:

- Енергоефективність. Питання енергоефективності є особливо актуальним у контексті зростаючих екологічних вимог та прагнення до зниження вуглецевого сліду;

- вплив на навколишнє середовище. Необхідно також враховувати потенційний вплив радіочастотних випромінювань на довкілля та здоров'я людей.

Аналіз потенційних областей застосування та обмежень підкреслює, що оптимізована система радіозв'язку має великий потенціал у широкому спектрі застосувань. Однак, для її успішного впровадження необхідно ретельно враховувати ряд технічних, економічних, регуляторних та екологічних факторів. Комплексний підхід до розв'язання цих викликів дозволить максимально реалізувати потенціал оптимізованої системи радіозв'язку та сприяти її ефективному застосуванню в майбутньому.

## 4 ВАЖЛИВІСТЬ ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ РОЄМ БПЛА ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО МОНІТОРИНГУ МЕРЕЖІ

4.1 Глибоке розуміння взаємозв'язку між стабільним радіозв'язком та ефективним моніторингом у мережах БПЛА

В ході моєї попередньої наукової роботи я виявив, що одним з ключових елементів успішного моніторингу вузлів комп'ютерної мережі за допомогою рою БПЛА є забезпечення стабільного радіозв'язку. Це спостереження спонукало мене до детального вивчення цієї проблеми та пошуку можливих шляхів її вирішення у моїй дипломній роботі.

### 4.1.1 Важливість стабільного радіозв'язку для моніторингу мережі

1 Забезпечення неперервності зв'язку: було виявлено, що неперервність зв'язку між БПЛА та контрольним центром є критичною для точного моніторингу та управління роєм. Переривання зв'язку може призвести до неправильного збору даних або втрати важливої інформації.

2 Точність та ефективність даних: стабільний радіозв'язок забезпечує точність передачі даних, що необхідно для аналізу стану мережевих вузлів. Це дозволяє оперативно виявляти та реагувати на будь-які аномалії чи зміни в мережі.

3 Координація та взаємодія рою БПЛА: координація дій усередині рою БПЛА безпосередньо залежить від якості зв'язку. Надійне зв'язування між апаратами є ключем до ефективного розподілу завдань та уникнення перекриття функцій.

### 4.1.2 Аналіз можливих рішень:

На основі цих спостережень, у даному розділі буде здійснено аналіз

потенційних технологічних рішень, які можуть вирішити проблему стабільного радіозв'язку в контексті моніторингу вузлів комп'ютерної мережі за допомогою БПЛА. Особлива увага буде приділена аспектам, які ми розглянемо нижче.

### 1 Оптимізація протоколів радіозв'язку:

- дослідження та аналіз сучасних протоколів радіозв'язку, які можуть бути адаптовані або оптимізовані для забезпечення більш стабільного та ефективного зв'язку між БПЛА;

- розгляд можливостей використання адаптивних технологій, які можуть динамічно змінювати параметри зв'язку залежно від умов середовища.

### 2 Застосування технології MIMO:

- аналіз можливостей використання MIMO та її варіантів, таких як Massive MIMO, для збільшення пропускної спроможності та надійності зв'язку в мережах БПЛА;

- оцінка переваг та обмежень MIMO у контексті специфіки роботи роїв БПЛА.

### 3 Інтеграція з іншими системами зв'язку:

- розгляд можливостей інтеграції радіозв'язку БПЛА з іншими системами зв'язку, включаючи супутниковий та мобільний зв'язок, для підвищення гнучкості та надійності мережі;

- вивчення можливостей створення гібридних систем зв'язку, які можуть автоматично переключатися між різними каналами зв'язку в залежності від умов.

Ці дослідження та аналізи допоможуть зрозуміти, яким чином можна ефективно вдосконалити системи радіозв'язку для максимального підвищення ефективності управління роєм БПЛА. Оптимізація радіозв'язку є ключовим фактором, що впливає на здатність рою БПЛА ефективно виконувати місії моніторингу та збору даних, що є надзвичайно важливим для управління вузлами комп'ютерної мережі. Інноваційні підходи в цій області можуть відкрити нові можливості для підвищення продуктивності та надійності в

мережевих операціях.

## 4.2 Оптимізація протоколів радіозв'язку для управління роєм БПЛА

### 4.2.1 Аналіз сучасних протоколів радіозв'язку для управління роєм БПЛА

В контексті управління роєм БПЛА, особливо для завдань моніторингу вузлів комп'ютерних мереж, критично важливим є вибір оптимальних протоколів радіозв'язку. Це дозволяє забезпечити надійний та ефективний обмін даними між апаратами та контрольним центром. У цьому підрозділі розглядаються сучасні протоколи радіозв'язку, їх особливості та потенціал для оптимізації в контексті управління роєм БПЛА. Нижче ми розглянемо основні аспекти сучасних протоколів радіозв'язку.

- 1 Пропускна спроможність та надійність: пропускна спроможність є вирішальним фактором, що впливає на здатність системи передавати великі об'єми даних, які часто необхідні при моніторингу. Надійність зв'язку забезпечує безперебійну передачу цих даних;
- 2 Затримка у передачі даних: мінімізація затримок у передачі даних є ключовою для оперативного управління роєм БПЛА, особливо у критичних ситуаціях, де швидке реагування може бути необхідним;
- 3 Масштабованість та гнучкість: масштабованість протоколу забезпечує його здатність адаптуватися до змін у розмірах та складності мережі БПЛА. Гнучкість дозволяє налаштовувати систему під конкретні завдання та умови використання, що є важливим для різних сценаріїв моніторингу;
- 4 Стійкість до перешкод та шумів: у місцевостях з високим рівнем радіоелектронних перешкод, важливо, щоб протоколи радіозв'язку забезпечували стійкість до зовнішніх впливів, забезпечуючи надійний зв'язок між БПЛА та контрольним центром;
- 5 Енергоефективність: оскільки БПЛА часто обмежені у плані джерел

енергії, енергоефективність протоколів радіозв'язку є важливим аспектом, який впливає на тривалість місій та загальну продуктивність системи.

На основі цього аналізу можна визначити ряд напрямків для подальшої оптимізації протоколів радіозв'язку, з метою підвищення ефективності управління роєм БПЛА, які будуть наведені нижче.

- 1 Розробка адаптивних протоколів: розробка протоколів, які можуть автоматично налаштовуватися на зміни в умовах передачі даних, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю передачі, надійністю та енергоефективністю;
- 2 Інтеграція з розширеними технологіями: інтеграція протоколів радіозв'язку з передовими технологіями, такими як МІМО, для збільшення пропускнуої спроможності та покращення стійкості зв'язку в складних умовах;
- 3 Удосконалення механізмів захисту від перешкод: розвиток алгоритмів, що забезпечують стійкість до перешкод та шумів, для забезпечення безперебійної роботи системи радіозв'язку навіть у важких умовах експлуатації;
- 4 Фокус на енергоефективності: розробка та впровадження протоколів, які оптимізують використання енергії, особливо важливо для збільшення тривалості місій та автономності БПЛА.

Цей глибокий аналіз існуючих протоколів та потенціалу їх оптимізації відкриває нові можливості для підвищення ефективності управління роєм БПЛА. Інноваційні підходи у цій області можуть значно вдосконалити здатність роїв БПЛА виконувати завдання моніторингу комп'ютерних мереж, забезпечуючи більш точні та надійні дані для аналізу та управління.

#### 4.2.2 Розробка адаптивних та ефективних стратегій радіозв'язку для управління роєм БПЛА

На основі аналізу сучасних протоколів радіозв'язку, наступним кроком є розробка адаптивних та ефективних стратегій радіозв'язку, які можуть бути спеціально налаштовані для використання в системах управління роєм БПЛА. Цей підрозділ фокусується на ключових аспектах, які потрібно враховувати при розробці цих стратегій.

Адаптивність як основний принцип:

- 1 Гнучкість у виборі частотних діапазонів. Розробка систем, здатних оперативно змінювати частотні діапазони в залежності від умов та перешкод, що зустрічаються у реальному часі;
- 2 Автоматизація налаштувань параметрів зв'язку. Впровадження алгоритмів, які автоматично адаптують параметри зв'язку, такі як потужність сигналу та швидкість передачі даних, для оптимізації продуктивності системи.

Ефективність та надійність:

- 1 Мінімізація втрат та затримок у системі. Фокус на розробці стратегій, які зменшують втрати даних та затримки в мережі, що важливо для синхронізації дій між апаратами у рої;
- 2 Забезпечення високої пропускну спроможності. Розробка систем, здатних підтримувати високу пропускну спроможність для передачі великих об'ємів даних, які можуть бути зібрані БПЛА під час місій моніторингу;
- 3 Підвищення стабільності сигналу. Використання передових технік обробки сигналів для забезпечення стабільного та якісного зв'язку навіть у важких умовах, наприклад, в густонаселених або промислових зонах.

Інноваційні підходи до радіозв'язку:

- 1 Використання машинного навчання та штучного інтелекту. Розробка алгоритмів на основі машинного навчання, які можуть прогнозувати та адаптуватися до змін у мережевому середовищі, що забезпечує вищий рівень ефективності управління роєм;

- 2 Інтеграція з розширеними системами контролю. Розробка та інтеграція систем радіозв'язку з розширеними системами контролю для забезпечення повного спектра моніторингу та управління роєм БПЛА.

Цей підрозділ підкреслює важливість розробки адаптивних та ефективних стратегій радіозв'язку, які є ключовими для успішного управління роєм БПЛА, особливо в контексті завдань моніторингу комп'ютерних мереж. Інноваційні підходи до радіозв'язку можуть значно покращити продуктивність рою, забезпечуючи більш ефективне та надійне збирання даних.

#### 4.3 Практичне застосування оптимізованих алгоритмів у мережах БПЛА

##### 4.3.1 Переваги використання технології MIMO в системах радіозв'язку БПЛА

Використання технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) у системах радіозв'язку БПЛА відкриває нові можливості для покращення ефективності управління роєм. Цей підрозділ зосереджується на аналізі переваг, які MIMO пропонує для оптимізації радіозв'язку в контексті БПЛА, особливо у випадках, де потрібен високий рівень даних та надійності зв'язку.

Збільшення пропускної спроможності:

- 1 Поліпшення ємності каналу. MIMO здатна значно збільшити ємність каналу, використовуючи кілька передавальних та приймальних антен, що дозволяє одночасно передавати більше даних;
- 2 Ефективне використання спектру. Завдяки множинному використанню одного і того ж частотного спектру, MIMO дозволяє ефективніше використовувати доступні радіочастоти, що є критично важливим у переповнених чи обмежених радіоспектрах.

Підвищення надійності зв'язку:

- 1 Просторове розмаїття. Використання кількох антен дозволяє MIMO створювати кілька незалежних каналів зв'язку, що зменшує

- ймовірність переривання зв'язку через перешкоди чи слабкі сигнали;
- 2 Зменшення впливу перешкод. МІМО може ефективно розподіляти сигнал між різними антенами, знижуючи вплив перешкод і підвищуючи загальну стійкість системи радіозв'язку.

Ефективність у складних умовах:

- 1 Адаптація до різних умов середовища. Можливість МІМО адаптуватися до різних умов, таких як гірські місцевості або міські агломерації, робить її ідеальною для використання в різноманітних сценаріях моніторингу за допомогою БПЛА;
- 2 Вища ефективність у густонаселених зонах. В густонаселених зонах, де ризик перешкод та затримок в зв'язку вищий, МІМО може забезпечити стабільний зв'язок завдяки своїм передовим алгоритмам обробки сигналів та здатності використовувати кілька каналів зв'язку одночасно.

Цей підрозділ підкреслює, що застосування МІМО в системах радіозв'язку БПЛА відкриває шлях до значного покращення як ефективності, так і надійності зв'язку, що є ключовим для успішного управління роєм БПЛА, особливо у складних місцях моніторингу. Використання МІМО дозволяє не тільки підвищити якість зв'язку, але й забезпечити більшу гнучкість та адаптивність у відповідь на змінні умови експлуатації, що є важливим аспектом для забезпечення стабільності та ефективності мережевих операцій БПЛА.

#### 4.3.2 Інтеграція з розширеними системами контролю

Інтеграція систем радіозв'язку БПЛА з розширеними системами контролю відіграє важливу роль у підвищенні ефективності моніторингу та управління роєм. Цей підрозділ досліджує, як інноваційні підходи в радіозв'язку, особливо з використанням МІМО, можуть бути інтегровані з системами контролю для створення більш ефективних та надійних мережевих

рішень.

Злиття радіозв'язку та систем контролю:

1. Підвищення автономності БПЛА. Інтеграція радіозв'язку з системами контролю дозволяє БПЛА приймати більш обґрунтовані та автономні рішення на основі отриманої інформації, зменшуючи залежність від операторів;
2. Розширені можливості моніторингу. Комбінація сучасних систем радіозв'язку з розширеними сенсорами та іншими засобами контролю дозволяє БПЛА збирати більш точну та різноманітну інформацію, підвищуючи якість моніторингу.

Оптимізація управління роєм:

1. Координація дій рою. За допомогою інтегрованих систем можна більш ефективно координувати дії БПЛА у рої, забезпечуючи більшу синхронізацію та ефективність у виконанні завдань;
2. Адаптація до різноманітних умов. Інтегровані системи контролю дозволяють БПЛА адаптуватися до різних умов експлуатації, забезпечуючи оптимальне виконання завдань у різноманітних середовищах.

Впровадження інновацій:

1. Використання штучного інтелекту. Інтеграція штучного інтелекту в системи контролю та радіозв'язку може допомогти в аналізі даних, прогнозуванні ситуацій та прийнятті рішень в реальному часі;
2. Автоматизація процесів реагування. Інтеграція радіозв'язку з авангардними системами контролю може сприяти автоматизації процесів реагування БПЛА на різні ситуації, підвищуючи швидкість та точність виконання завдань.

Забезпечення надійності та безпеки:

1. Підвищення надійності систем. Завдяки інтеграції, системи радіозв'язку та контролю можуть взаємодіяти для забезпечення вищої надійності та безперебійності роботи, особливо в критичних місцях;

2. Забезпечення безпеки даних. Інтегровані системи можуть включати розширені механізми захисту даних, забезпечуючи безпеку передаваної інформації та захист від несанкціонованого доступу.

Цей підрозділ демонструє, як інтеграція систем радіозв'язку з розширеними системами контролю може створити більш потужну, гнучку та надійну платформу для управління роєм БПЛА. Використання цих інтегрованих систем відкриває нові можливості для підвищення ефективності моніторингу та управління, забезпечуючи більш точний та безпечний збір даних.

#### 4.4 Синергія між оптимізацією радіозв'язку та алгоритмами управління

##### 4.4.1 Вивчення взаємного посилення ефективності радіозв'язку та алгоритмів управління

В контексті управління роєм БПЛА, взаємодія між системами радіозв'язку та алгоритмами управління є ключовим аспектом, що впливає на загальну продуктивність та ефективність системи. Підрозділ 4.4.1 зосереджується на аналізі, як оптимізація радіозв'язку може посилити ефективність алгоритмів управління, і навпаки, як розумні алгоритми управління можуть покращувати використання систем радіозв'язку.

Синергія між радіозв'язком та управлінням:

- 1 Покращення реакції на зміни умов. Інтеграція адаптивних систем радіозв'язку з алгоритмами управління дозволяє рою БПЛА швидше та ефективніше реагувати на зміни умов, таких як перешкоди чи зміни в топографії;
- 2 Оптимізація розподілу ресурсів. Ефективне використання радіозв'язку за допомогою алгоритмів управління дозволяє більш раціонально розподіляти ресурси між БПЛА, забезпечуючи оптимальну продуктивність рою.

Взаємодоповнюючий ефект:

- 1 Підвищення продуктивності моніторингу. Спільне використання розширених систем радіозв'язку та інтелектуальних алгоритмів управління забезпечує більш точний та ефективний моніторинг, що є особливо важливим у задачах, пов'язаних із виявленням та аналізом вузлів комп'ютерних мереж;
- 2 Зменшення помилок та втрат сигналу. Використання розумних алгоритмів управління, які адаптуються до умов радіозв'язку, дозволяє знизити ймовірність помилок та втрат сигналу, підвищуючи загальну надійність системи.

Адаптивність та гнучкість:

- 1 Адаптивне управління ресурсами. Інтеграція адаптивних систем радіозв'язку з алгоритмами управління дозволяє більш ефективно управляти ресурсами рою БПЛА, адаптуючись до різних операційних умов;
- 2 Гнучке налаштування алгоритмів. Використання гнучких алгоритмів, які можуть налаштовуватися в залежності від умов радіозв'язку, забезпечує більшу адаптивність та відповідність до конкретних вимог моніторингу.

Цей підрозділ демонструє, як поєднання передових систем радіозв'язку з розумними алгоритмами управління може створити синергію, яка значно покращує загальну ефективність рою БПЛА у задачах моніторингу комп'ютерних мереж. Це поєднання дозволяє не тільки підвищити надійність та ефективність моніторингу, але й забезпечує більшу гнучкість та адаптивність системи до різних умов та вимог.

#### 4.4.2 Розгляд потенціалу для подальших досліджень та розвитку

Після аналізу того, як оптимізація радіозв'язку може підвищити ефективність алгоритмів управління роєм БПЛА, наступним кроком є розгляд потенціалу для подальших досліджень та розвитку в цій області. Цей підрозділ

зосереджується на перспективах інновацій та покращень, які можуть бути впроваджені в майбутньому.

Напрямки подальших досліджень:

- 1 Розвиток розширених алгоритмів радіозв'язку. Дослідження нових методів і технологій в радіозв'язку, таких як розширений аналіз спектру та передові методи модуляції, які можуть підвищити ефективність та надійність систем;
- 2 Інтеграція з інноваційними технологіями. Вивчення можливостей інтеграції систем радіозв'язку з новітніми технологіями, такими як квантовий зв'язок або мережі наступного покоління, для забезпечення більш ефективного управління роєм БПЛА;
- 3 Експерименти з різними конфігураціями радіосистем. Проведення експериментів з різними конфігураціями радіосистем для з'ясування оптимальних налаштувань для специфічних сценаріїв використання БПЛА.

Можливі напрямки розвитку:

- 1 Автоматизація та штучний інтелект у радіозв'язку. Впровадження автоматизованих систем управління радіозв'язком з використанням штучного інтелекту, щоб забезпечити більш точне та ефективне налаштування систем в реальному часі;
- 2 Покращення сумісності між різними платформами. Розробка універсальних протоколів радіозв'язку, які забезпечують високу сумісність між різними платформами та технологіями, що використовуються в різних типах БПЛА.

Виклики та перспективи:

- 1 Баланс між інноваціями та надійністю. Підтримка балансу між інноваційними рішеннями в радіозв'язку та забезпеченням надійності та безпеки систем, особливо у важливих місіях;
- 2 Розширення діапазону застосування. Розвиток систем радіозв'язку, які можуть бути ефективно використані в широкому спектрі умов,

включаючи складні промислові та природні середовища.

Цей підрозділ підкреслює, що постійне дослідження та розвиток в області радіозв'язку є важливим для досягнення нових рівнів ефективності управління роєм БПЛА. Інновації в цій сфері відкривають нові можливості для підвищення продуктивності, надійності та гнучкості систем моніторингу та управління.

#### 4.5 Виклики та перспективи у використанні оптимізованих алгоритмів

##### 4.5.1 Оцінка поточних викликів та можливих обмежень у застосуванні оптимізованих алгоритмів управління роєм БПЛА

У цьому підрозділі ми розглядаємо поточні виклики та обмеження, з якими стикаються розробники та оператори при застосуванні оптимізованих алгоритмів управління роєм БПЛА. Ці виклики включають технічні, економічні та регуляторні аспекти, що впливають на ефективність та надійність систем [11].

Технічні виклики:

- 1 Обмеження потужності та витривалості БПЛА. Один з основних технічних викликів полягає у обмеженні потужності та витривалості БПЛА, що обмежує можливості для тривалих або складних місій;
- 2 Комплексність системи. Збільшення складності системи управління роєм БПЛА може призвести до зростання ризику помилок та ускладнення процесів діагностики та обслуговування.

Економічні обмеження:

- 1 Високі витрати на розвиток та впровадження. Розробка та впровадження оптимізованих алгоритмів управління може вимагати значних фінансових інвестицій, які можуть бути обмежуючим фактором для деяких організацій;
- 2 Потреба у спеціалізованому обладнанні та навичках. Ефективне використання оптимізованих систем вимагає висококваліфікованих

спеціалістів та спеціалізованого обладнання, що також може підвищити загальні витрати.

Регуляторні виклики:

- 1 Дотримання нормативних вимог. Суворі регуляторні вимоги щодо безпеки польотів та використання повітряного простору можуть становити виклик для впровадження нових технологій управління роєм БПЛА;
- 2 Проблеми сумісності з існуючими стандартами. Нововведення в технологіях управління БПЛА можуть вимагати перегляду існуючих стандартів та протоколів, що може бути складним та часозатратним процесом.

Цей підрозділ підкреслює, що хоча оптимізація алгоритмів управління роєм БПЛА відкриває нові можливості для підвищення ефективності та функціональності, існують значні виклики, які потребують уваги. Врахування цих викликів та обмежень є важливим для реалізації потенціалу оптимізованих систем управління у практичних сценаріях. Розвиток та впровадження цих технологій вимагає комплексного підходу, що включає технічні інновації, фінансове планування та регуляторні заходи.

#### 4.5.2 Перспективи розвитку та можливі напрямки майбутніх досліджень

Після оцінки поточних викликів та обмежень у застосуванні оптимізованих алгоритмів управління роєм БПЛА, важливо розглянути можливі напрямки розвитку та перспективи майбутніх досліджень. Цей підрозділ досліджує потенціал інновацій та покращень, що можуть сприяти подальшому розвитку технологій у цій сфері [12].

Інновації у технологіях управління роєм:

- 1 Розвиток штучного інтелекту (ШІ). Використання ШІ для покращення алгоритмів управління, зокрема у плануванні місій, адаптації до змінних умов та автоматичному прийнятті рішень;

- 2 Автономність рою БПЛА. Розвиток технологій, які забезпечують більшу автономність БПЛА, включаючи вдосконалення в області навігації, спостереження та взаємодії апаратів у рої.

Розширення функціональності та застосувань:

- 1 Інтеграція з різноманітними системами. Розробка інтегрованих рішень, що поєднують БПЛА з іншими системами, такими як супутниковий зв'язок, Інтернет речей (IoT) та мобільні платформи;
- 2 Розширення сфер застосування. Дослідження нових можливостей застосування роїв БПЛА в різних галузях, включаючи сільське господарство, екологічний моніторинг, пошуково-рятувальні операції та багато інших.

Перспективи розвитку:

- 1 Розвиток стандартів та протоколів. Формування та узгодження стандартів та протоколів, які б дозволяли ефективно інтегрувати нові технології управління роєм в існуючі системи;
- 2 Екологічна стійкість та енергоефективність. Розробка енергоефективних технологій і підходів, що сприяють екологічній стійкості систем БПЛА, зокрема зниження вуглецевого відбитка та використання відновлювальних джерел енергії;
- 3 Співпраця з регуляторними органами. Активна співпраця з регуляторними органами для розвитку нормативної бази, яка б враховувала інноваційні підходи в управлінні роєм БПЛА.

Виклики та напрямки досліджень:

- 1 Дослідження захисту даних та кібербезпеки. Зосередження на питаннях захисту даних та кібербезпеки, особливо в умовах збільшення об'ємів переданих даних та складності систем;
- 2 Розробка гнучких та модульних систем. Створення гнучких і модульних систем управління, які можуть бути легко адаптовані під різні завдання та умови експлуатації.

Цей підрозділ підкреслює, що подальший розвиток та дослідження в

області оптимізованих алгоритмів управління роєм БПЛА має великий потенціал для підвищення ефективності моніторингу та виконання місій. Водночас, інновації повинні йти поруч з увагою до надійності, безпеки, екологічної стійкості та відповідності нормативним стандартам.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання даної кваліфікаційної роботи, яка була присвячена дослідженню методів моніторингу вузлів комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА, було розроблено новаторський Адаптивний Шенон-базований метод передачі даних (ASHBMT). Цей метод інтегрує принципи теореми Шенона з адаптивними елементами та системою MIMO, що значно покращує пропускну спроможність та надійність зв'язку.

Одним з ключових аспектів роботи було дослідження якості зв'язку при різній кількості антен в системі MIMO, що відкрило нові можливості для підвищення ефективності моніторингу в складних умовах. Аналіз різних реалістичних сценаріїв з використанням ASHBMT продемонстрував його ефективність у різних умовах, включаючи високий рівень шуму та різні дистанції.

Результати дослідження підтвердили, що стабільність і ефективність радіозв'язку є вирішальними факторами для ефективного управління роєм БПЛА. Інтеграція алгоритмів управління з передовими технологіями радіозв'язку та штучним інтелектом значно розширює функціональність та автономність рою.

Проте, дослідження також виявило виклики, зокрема економічні та регуляторні, що стоять перед впровадженням нових технологій. Вирішення цих проблем вимагає комплексного підходу, включаючи розробку вартісно-ефективних рішень та активну співпрацю з регуляторними органами.

У підсумку, ця кваліфікаційна робота зробила значний вклад у розвиток методів моніторингу вузлів комп'ютерної мережі з використанням рою БПЛА. Розробка ASHBMT і його успішне застосування в різних умовах відкриває шляхи для подальших досліджень та розвитку, пропонуючи нові можливості для підвищення ефективності, безпеки та надійності моніторингу в майбутньому.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Апенько Н. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ. ГРААЛЬ НАУКИ. 2021. С. 205–207.
2. Ткачов, В.М., Митин, Д.Е., Дух, Я.В. (2018). Підвищення живучості мережної складової рою БПЛА. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі: Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (21-23 березня 2018 р.). С. 98-100. [Електронний ресурс].
3. Ivaniuk V., Potarova K., Nalyvaychuk M. SURVEY OF NEURAL NETWORKS AND STANDARD IMAGE PROCESSING ALGORITHMS IN THE FIELD OF COMPUTER VISION. International scientific journal "Internauka". 2023. No. 15(149).
4. Ревякін О. О., Попков Д. М. Концепція мобільного додатка підтримки бездротової передачі даних за допомогою WI-FI. Automation of technological and business processes. 2022. Т. 13, № 4. С. 8–12.
5. Ященко К. А. Спеціалізовані програмні засоби БПЛА : thesis. 2020. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/51040>.
6. Bristol International UAV Systems Conference (23rd 2008 Bristol, England). UAVs Twenty-third International Conference : 7 April -9 April 2008, Bristol, United Kingdom : conference papers. [Bristol, U.K.] : University of Bristol, Dept. of Aerospace Engineering, 2008.
7. Droniuk I. M., Fedevych O. Y. ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАФІКУ ПОТОКУ В СЕГМЕНТІ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ. Scientific Bulletin of UNFU. 2015. Т. 25, № 10. С. 295–301.
8. Мельниченко Д. В., Зенкін М. А. Метрологічний контроль електромагнітних полів засобів рухомого радіозв'язку : thesis. 2016.

URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/5255>.

9. Марчук А. В. Методи підвищення достовірності передачі інформації в системах радіодоступу MIMO : автореф. дис. канд. техн. наук. Харків, 2010. 18 с.
10. Method of evaluation of channel parameters with technology MIMO-SEFDM / О. Г. Жук та ін. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2018. № 1(30). С. 86–91.
11. Погореленко В. В. Важливість оптимізації алгоритмів управління роєм БПЛА для ефективного моніторингу мережі. Міжнародна наукова інтернет-конференція: «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення випуск 82», 9-11 лис., 2023 р. Харків, 2023. С.68-70.
12. UAV Communication. Encyclopedia of Wireless Networks. Cham, 2020. P. 1423.