

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:
**«СИСТЕМА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ВІЙСЬКОВІЙ ЛОГІСТИЦІ З
ВИКОРИСТАННЯМ РОЇВ БПЛА»**

на здобуття освітнього ступеня магістр
за спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

_____ Альона ЛЕСНІКОВА
(підпис) *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)*

Виконав:
здобувач вищої освіти
група ІСДМ-62

Керівник
к.т.н.

Рецензент:

_____ Альона ЛЕСНІКОВА
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
_____ Ольга ПОЛОНЕВИЧ
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
_____ *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедру ІСТ
Каміла СТОРЧАК
“ ____ ” _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Леснікової Альони Миколаївни

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система прийняття рішень у військовій логістиці з використанням роїв БПЛА

керівник кваліфікаційної роботи: Ольга ПОЛОНЕВИЧ к.т.н., доцент
(ім'я, ПРИЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “30” жовтня 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «26» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

1. Технології використання роїв БПЛА.
2. Галузі застосування роїв БПЛА.
3. Найновіші розробки в галузі безпілотних літальних апаратів.
4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Теоретичні основи використання роїв БПЛА у військовій логістиці.
2. Аналіз можливостей розвідувальних операцій з використанням роїв БПЛА.
3. Дослідження планування шляху для роїв.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «30» жовтня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1. | Підбір технічної літератури | | |
| 2. | Дослідження тенденцій розвитку в галузі безпілотних літальних апаратів | | |
| 3. | Дослідження методів використання роїв БПЛА | | |
| 4. | Результати аналізу навігаційних стратегій | | |
| 5. | Висновки по роботі | | |
| 6. | Розробка демонстраційних матеріалів, доповідь. | | |
| 7. | Оформлення магістерської роботи | | |

Здобувач вищої освіти _____ Альона ЛЕСНІКОВА
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Ольга ПОЛОНЕВИЧ
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 57 стор, 10 рис., 67 джерел.

Мета роботи – обґрунтування застосування системи прийняття рішень у військовій логістиці з використанням роїв БПЛА для підвищення ефективності планування та управління логістичними процесами.

Об'єкт дослідження – процеси військової логістики.

Предмет дослідження – методи та засоби прийняття рішень у військовій логістиці з використанням роїв БПЛА

Короткий зміст роботи: Цей огляд синтезує та оцінює найновіші розробки в галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та ройової робототехніки, з особливим акцентом на стратегії оптимізації, планування траєкторій та керування формуванням. Дослідження визначає ключові методології, що сприяють прогресу в цій галузі, шляхом проведення комплексного аналізу семи критичних публікацій. Включено наступне: платформи на основі датчиків, які сприяють ефективному уникненню перешкод, кластерне ієрархічне планування траєкторій для ефективної навігації та адаптивні гібридні контролери для динамічних середовищ. В огляді підкреслюється суттєвий внесок методів оптимізації, включаючи максимально-мінімальну оптимізацію колонії мурах, у покращення швидкості конвергенції та підвищення ефективності траєкторій. Ефективність різних навігаційних систем у різних операційних контекстах демонструється за допомогою порівняльного аналізу, який надає цінну інформацію про адаптивність та продуктивність системи. Основні висновки підкреслюють сильні сторони та обмеження сучасних методологій, тим самим виявляючи прогалини в дослідженнях та практичному застосуванні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: УПРАВЛІННЯ ФОРМУВАННЯМ, ОПТИМІЗАЦІЙНІ ПІДХОДИ, ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ, РОЙОВА РОБОТОТЕХНІКА ТА НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ БПЛА

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 55 pages, 10 pictures, 67 sources.

The purpose of the work is to substantiate the application of a decision-making system in military logistics using UAV swarms to increase the efficiency of planning and management of logistics processes.

The object of the study is military logistics processes.

The subject of the study is methods and means of decision-making in military logistics using UAV swarms

Subject of research – This review synthesizes and evaluates the latest developments in the field of unmanned aerial vehicles (UAVs) and swarm robotics, with a particular focus on optimization strategies, trajectory planning, and formation control. The study identifies key methodologies that contribute to progress in this field by conducting a comprehensive analysis of seven critical publications. The following are included: sensor-based platforms that facilitate efficient obstacle avoidance, clustered hierarchical trajectory planning for efficient navigation, and adaptive hybrid controllers for dynamic environments. The review highlights the significant contribution of optimization methods, including maximum-minimum ant colony optimization (MMACO), in improving convergence speed and enhancing trajectory efficiency. The effectiveness of different navigation systems in different operational contexts is demonstrated through a comparative analysis that provides valuable information on system adaptability and performance. The main findings highlight the strengths and limitations of current methodologies, thereby identifying gaps in research and practical application.

KEYWORDS: FORMATION MANAGEMENT, OPTIMIZATION APPROACHES, TRAJECTORY PLANNING, SWARM ROBOTICS AND UAV NAVIGATION SYSTEMS

ЗМІСТ

| | |
|---|--|
| ВСТУП | 8 |
| 1. | 910 |
| 1.1 Історія розвитку роботизованих комплексів для розвідувальних операцій | 10 |
| 1.2 Помилка! Закладку не визначено. | |
| 22 | |
| 1.3 Особливості та характеристики роїв БПЛА | 26 |
| 1.4 Галузі застосування роїв БПЛА | 29 |
| 1.5 Міркування щодо безпеки та конфіденційності | 35 |
| 2. | Помилка! Закладку не визначено. |
| 2.1 Технічні характеристики та можливості | |
| 2.2 Значення контролю формування, планування траєкторії та оптимізації | 40 |
| 2.3 Найсучасніші підходи операцій з використанням роїв БПЛА | 49 |
| 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНУВАННЯ ШЛЯХУ ДЛЯ РОЇВ | 52 |
| 3.1. Оптимізація колонії мурах за принципом максимально-мінімального | 52 |
| 3.2 Гібридні моделі оптимізації | 60 |
| 3.3. Сенсорні платформи для БПЛА | 63 |
| 3.4 Порівняльний аналіз навігаційних стратегій | 66 |
| ВИСНОВКИ | 72 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ | 73 |

ВСТУП

Актуальність. Наразі великомасштабні рої безпілотних літальних апаратів (БПЛА) знайшли широке застосування в цивільній та військовій сферах. Наприклад, вони використовуються в експрес-логістиці, захисті сільськогосподарських рослин, наданні допомоги в надзвичайних ситуаціях, а також у розвідці, спостереженні та перехопленні. Спільне прийняття рішень роєм відіграє вирішальну роль у забезпеченні повністю автономних роїв БПЛА для виконання різних завдань. Обмін інформацією між членами рою є необхідною умовою для спільного прийняття рішень. Існуючі системи рою БПЛА переважно покладаються на централізоване або децентралізоване керування, використовуючи бездротовий зв'язок для обміну даними про позиції, швидкості та положення, отриманими від глобальної навігаційної супутникової системи. Тим не менш, ці підходи мають обмеження, пов'язані з перешкодами з боку супротивників або навколишнього середовища, а також з ненадійними каналами передачі даних. Моделі прийняття рішень роєм, що залежать від бездротового зв'язку, несуть значні ризики, оскільки БПЛА не мають автономії для прийняття рішень у випадках збою, таких як перебої в зв'язку.

Мета роботи – вивчення та всебічне дослідження інфраструктури роїв БПЛА, останніх дослідницьких досягнень та різноманітних застосувань.

Для виконання поставленої мети, у бакалаврській роботі розроблено та виконано наступні завдання:

- Дослідження ключових аспектів дослідження, таких як скоординоване планування маршруту, розподіл завдань, управління формуванням та комунікація;
- Аналіз питань безпеки та конфіденційності;
- Детальний огляд інфраструктури та особливостей роїв БПЛА.

Об'єкт дослідження – ключові аспекти роїв БПЛА, починаючи з огляду їхньої інфраструктури та відмінних рис.

Предмет дослідження – скоординоване планування маршруту, розподіл завдань, управління формуванням, протоколи зв'язку, а також врахування питань безпеки та конфіденційності.

Методи дослідження. Під час виконання завдань бакалаврської кваліфікаційної роботи розглядаються дослідницькі аспекти роїв БПЛА, зосереджуючись на останніх досягненнях та поточних розробках в інтеграції штучного інтелекту та методах машинного навчання. Потім обговорення переходить до різноманітних областей застосування роїв БПЛА, детально описуючи їхню роль у цивільній та військовій сферах.

Наукова новизна одержаних результатів. У ході дослідження описано новий підхід аналізу навігаційних стратегій, таких як підходи «Найшвидший шлях» та «Найближчий сусід», який надає практичні поради.

Практична значущість одержаних результатів. Запропонована модель забезпечує ефективне рішення для проектування сенсорних систем для БПЛА.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення і результати магістерської роботи доповідались на науково практичних конференціях, що проходили на базі Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ РОЇВ БПЛА У ВІЙСЬКОВІЙ ЛОГІСТИЦІ

1.1 Історія розвитку роботизованих комплексів для розвідувальних операцій

Воєнні засоби та методи війни - постійно змінюються. Країни повинні адаптуватися або ризикувати поразкою на полі бою. Війна — це людська діяльність, але знаряддя війни можуть бути і часто є вирішальними. Ніяке завзяття не здолає кулі кулемета. Жодна сила духу не зможе захистити відкриті сухопутні сили від невпинного обстрілу повітряних сил.

Збройні сили, які розміщують країни, є продуктом бажання залишатися попереду в постійно мінливій конкуренції інновацій і контрзаходів, але вони також формуються іншими факторами: наявними технологіями, цінностями суспільства, військовою бюрократією та культурою. Іноді ці фактори призводять до інновацій, а іноді вони можуть стримувати їх. Коли вони так роблять, поле битви стає суворим суддею. Зброя ворога не має значення, в якому окрузі конгресу була виготовлена броня танка, яка військова служба експлуатує літак або яка бюрократична вотчина виграла битву за вимоги до системи зброї.

У 1980-х роках технологічний розвиток датчиків, командно-контрольних мереж і високоточних боєприпасів уможливив можливість точного націлювання наземних сил у реальному часі з потенціалом для стратегічних ефектів, які раніше були неможливі без використання ядерної зброї. Радянські військові теоретики були першими, хто визнав кардинальний потенціал цих технологій і ввів термін «розвідувально-ударний комплекс», щоб описати синергетичну комбінацію датчиків, мереж і високоточних боєприпасів, що працюють разом.

Механізація та масове виробництво зробили можливим створення ранньої автоматичної зброї у дев'ятнадцятому столітті. Військові експерименти з машинами, які також були мобільними та безпілотними, розпочалися під час Першої світової війни, включаючи навіть радіокеровані літаки, перші безпілотні літальні апарати (БПЛА). Друга світова війна ознаменувалася оперативним використанням кількох видів безпілотної зброї як союзними, так і державами Осі,

включаючи дистанційно керовані бомби; це також був період швидкого розвитку аналогових та електронних обчислень.

Перші бойові мережі фактично виникли під час Другої світової війни. Під час битви за Британію Сполучене Королівство використовувало мережу радарів і споттерів, з'єднаних радіо- та телефонними кабелями, щоб направити британські винищувачі на наближення німецьких бомбардувальників.

Проте бойові дії все ще проводилися з некерованої зброї. Протягом наступних кількох десятиліть точність високоточних боєприпасів зросла, а датчики та мережеві технології також удосконалилися. На початку 1990-х вони досягли кульмінаційної точки, і переважна перемога США у війні в Перській затоці підтвердила радянські теорії про цінність розвідувально-ударних мереж на основі інформаційних технологій [1].

Сьогодні складні національні держави експлуатують розвідувально-ударні бойові мережі, що складаються з датчиків, мереж командування та управління та високоточної зброї. Поєднання цих елементів дозволяє силам вести бій як єдине ціле, здатне наносити точні удари на великій відстані. Ці технології з часом не лише поширюються в інших державах, але багато недорогих версій доступні недержавним суб'єктам. Нежилі та автономні системи забезпечать наступну еволюцію, оскільки сили переходять від боротьби як мережі до боротьби як зграя, з великою кількістю високоавтономних безлюдних систем, які координують свої дії на полі бою. Це забезпечить більшу масу, координацію, інтелект і швидкість, ніж це було б можливо з мережами населених людьми або навіть дистанційно керованих нежилых систем. Людське судження все ще буде важливим для багатьох рішень, але автоматизація допоможе людям швидко обробляти великі обсяги даних, одночасно контролювати велику кількість транспортних засобів і скорочувати цикли прийняття рішень, прискорюючи темп операцій.

Досягнення в ройовій робототехніці (SR), особливо в галузі повітряної робототехніки, принесли трансформаційні можливості, втілені в роях безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ці рої використовують повітряну мобільність, високошвидкісну маневреність та широкі можливості покриття, що робить їх ключовими в різних застосуваннях [2, 3, 4]. SR прагне розробити масштабовані,

надійні системи, де групи роботів співпрацюють один з одним та з навколишнім середовищем для ефективного виконання складних завдань. Натхненні природною соціальною поведінкою, такі системи перевершують аналоги з одним роботом у багатозадачності, масштабованості, економічній ефективності, надійності та адаптивності [5], особливо в літаючих роботах, що потребують скоординованої взаємодії та співпраці між кількома автономними агентами.

Система ройових роботів – це метод координації, що використовується в багатороботних системах (MRS), що складається з групи автономних і відносно простих роботів зі схожими можливостями. Ці роботи оснащені локальними сенсорними та комунікаційними здібностями, що дозволяє їм взаємодіяти локально між собою та з навколишнім середовищем. Така колективна взаємодія підвищує їхню ефективність у виконанні заздалегідь визначених завдань порівняно з окремими роботами [6]. Центральним елементом SR є координація MRS, де автономні повітряні агенти працюють колективно в плануванні шляху, розподілі завдань та управлінні формуванням. Ці агенти, різні за можливостями, але гармонійно взаємодіючи, роблять індивідуальний внесок, отримуючи колективну вигоду від спільного середовища.

Однією з важливих галузей досліджень роїв БПЛА є оптимізація планування траєкторії для кількох роботів у ройових середовищах. Алгоритми ройового інтелекту (SI), натхненні природною поведінкою, сприяють спільному прийняттю рішень та координації для роїв БПЛА, забезпечуючи ефективне дослідження та навігацію в динамічних середовищах. Комбінаторні оптимізаційні підходи ще більше підвищують ефективність рою, максимізуючи колективну продуктивність завдяки оптимальному розподілу завдань та управлінню ресурсами [7,8]. Ще однією критично важливою сферою є управління формуванням рою, спрямоване на досягнення стабільних польотних утворень та мінімальних коливань відстані між роботами. Дослідницькі зусилля в цій галузі спрямовані на підвищення операційної ефективності рою та забезпечення синхронізованих рухів, необхідних для завдань, що потребують точної координації між ройовими роботами [9, 10].

У галузі SR для роїв БПЛА існуюча література охоплює широкий спектр дослідницьких тем та досягнень. Дослідження особливостей та характеристик SR

пролило світло на децентралізовану та самоорганізовану природу роїв, що надає їм стійкості, адаптивності та відмовостійкості. Тим не менш, впровадження SR у літаючих роботах створює унікальні проблеми, включаючи комунікацію, керування, масштабованість та обмеження ресурсів. Щоб подолати ці перешкоди, постійні дослідження зосереджені на інноваційних алгоритмах та інтеграції методів штучного інтелекту (ШІ). Нещодавні досягнення в галузі ШІ, глибокого навчання (ГН) та машинного навчання (МН) відіграють ключову роль у подоланні проблем та підвищенні загальної продуктивності ШН [11]. Ці технології дозволяють покращити координацію рою, розподіл завдань та навігацію, надаючи роям БПЛА можливість працювати з підвищеною ефективністю та адаптивністю. Алгоритми DL, здатні обробляти великі обсяги даних та навчатися на досвіді, значною мірою сприяють розвитку інтелектуальних автономних літаючих роботів у роях. Інтеграція ШІ, ГН та МН не тільки оптимізує операції рою, але й відкриває нові можливості в різних галузях [12].

Спектр застосування SR для роїв БПЛА охоплює різні області, де децентралізована та самоорганізована поведінка підвищує ефективність, надійність та адаптивність. Спільні зусилля роботів не лише покращують безпеку експлуатації завдяки взаємного моніторингу та допомозі, але й забезпечують адаптивність до динамічних змін навколишнього середовища [13].

Інфраструктура роїв БПЛА складається з кількох критично важливих компонентів, які разом забезпечують ефективну роботу та координацію рою, як зображено та детально описано в таблиці 1.1 відповідно. Кожен дрон або квадрокоптер служить окремим блоком у межах рою, оснащеним датчиками, процесорами та необхідним обладнанням для полегшення зв'язку та координації з іншими дронами. Блок керування відіграє центральну роль в управлінні роєм, забезпечуючи роботу дронів у межах бажаних параметрів. Це керування може здійснюватися через наземну станцію або хмарну систему, що забезпечує центральний інтерфейс для керування, моніторингу та прийому даних.

Таблиця 1.1. Компоненти інфраструктури роїв БПЛА

| Компонент | Опис |
|---------------------|---|
| Дрони/Квадрокоптери | Окремі блоки, оснащені датчиками, процесорами та апаратним забезпеченням для зв'язку та координації |
| Блок керування | Керує роєм, забезпечуючи роботу в межах бажаних параметрів, може включати наземну станцію або хмарну систему |
| Система зв'язку | Бездротова мережа для обміну інформацією в режимі реального часу з використанням таких протоколів, як Wi-Fi, Bluetooth або Zigbee |
| Датчики | Інтегровані датчики (наприклад, камери, LiDAR, GPS) для збору та обробки даних про навколишнє середовище |
| Алгоритми | Алгоритми SI для планування шляху, запобігання зіткненням, контролю формування та прийняття рішень |
| Джерело живлення | Акумулятори або підключені джерела живлення критично важливі для часу польоту та продуктивності |
| Навігаційна система | GPS, інерціальна навігація та візуальна одометрія для автономної навігації та запобігання зіткненням |

Надійна система зв'язку є важливою для обміну інформацією в режимі реального часу між БПЛА та з наземною станцією керування. Ця система зазвичай використовує бездротові протоколи, такі як Wi-Fi, Bluetooth або Zigbee. Інтегровані датчики, включаючи камери, LiDAR, GPS, акселерометри та гіроскопи, дозволяють

дронам збирати та обробляти дані про навколишнє середовище. Алгоритми, особливо ті, що базуються на SI, мають вирішальне значення для автономної координації, включаючи планування шляху, уникнення зіткнень, контроль формування та прийняття рішень.

Джерело живлення, часто батареї або підключене електроживлення, є критично важливим для роботи БПЛА, впливаючи на час польоту та загальну продуктивність. Зрештою, навігаційні системи, такі як GPS, інерціальна навігація та візуальна одометрія, дозволяють БПЛА автономно орієнтуватися та уникати зіткнень, забезпечуючи ефективну та безпечну експлуатацію.

Слово "робот" походить від слов'янського слова робота, що означає "раб". Це означає, що основна концепція розробки будь-якого робота полягає в тому, що він повинен підтримувати людську діяльність і полегшувати людські завдання. Насправді роботи — це запрограмовані машини, які пов'язані зі швидким розвитком інформатики. Доступність дешевих комп'ютерів, Інтернету, роботів-клубів і товариств, комплектів роботів і прогрес інформатики створили роботу-міхур. Багато осіб, компаній, освітніх секторів та урядів почали залучати роботів у свої домени. Тому в усьому світі спостерігається велика різноманітність розробок роботів. Ці розробки перетинаються з кількома концепціями, які визначають основні характеристики роботів. По-перше, робот має бути машиною. По-друге, робот повинен виявляти оточення. По-третє, перед роботом потрібно поставити цілі. Нарешті, він повинен діяти відповідно до намірів, для яких він був розроблений.

Визначення класифікації полягає в класифікації об'єктів на групи відповідно до відомих конкретних характеристик. Ці характеристики визначають подібність між об'єктами, які класифікуються. Чим більше характеристик використовується для визначення та категоризації об'єктів, тим більше рівнів потрібно в класифікації. Класифікація потребує трьох ключових пов'язаних понять. Перше поняття - це структура груп / класів, організованих за певними принципами. Друга концепція — це атрибути, необхідні для визначення кожної групи або класу. По-третє, процедура віднесення об'єктів до груп і класів. Існує додатково шість систематичних

властивостей для будь-якої класифікації: процес, межі, членство, критерії призначення, типовість і структура [14].

Класифікація роботів базується на визначенні міток, які можна присвоїти роботі. Побудова цих міток вимагає визначення того, що має бути позначено в роботі. Ці позначки відомі як характеристики можливостей робота. Це розміри, які використовуються для визначення робота. Сфера робототехніки є комплексною, мультидисциплінарною та складною. Щодня розробляється новий робот із розширеними можливостями для використання в різних галузях і несподіваних додатках. Тому, щоб визначити роботів, класифікаційні розміри та характеристики роботів повинні бути застосовні до всіх різних сфер, типів і підтипів у всіх областях, що вважається одним із головних завдань цього дослідження. Це особливо актуально з огляду на те, що характеристики роботів відрізняються залежно від галузі, і цю широку варіацію важко врахувати в одному списку чи процедурі.

Визначення та класифікація роботів відповідно до їхніх характеристик вимагає, щоб кожна характеристика була доступна в розмірах таксономії. Ці характерні розміри роботів чітко не встановлені, оскільки вони збільшуються в міру розвитку галузі робототехніки.

З іншого боку, класифікація роботів за певною ознакою призведе до збігу, якщо вона включає інші набори характеристик. Наприклад, класифікація робота-виробника з характеристиками маніпуляції, які містять деякі соціальні аспекти, означатиме, що він розглядається як робот-виробник, який взаємодіє з людьми. Тому його вважають соціальним роботом, навіть якщо він не виконує жодних соціальних завдань і не виконує соціальної поведінки. Ця неоднозначність визначень та класифікацій роботів у різних областях вважається однією з головних проблем цього дослідження.

Безпілотна авіаційна система (БПЛА) визначається як літальний апарат з двигуном, який не перевозить оператора-людину, використовує аеродинамічні сили для забезпечення підйомної сили та може літати автономно або дистанційно пілотуватися (ДПЛА). Безпілотні літальні апарати (БПЛА) швидко розвивалися останніми роками завдяки різноманітним зусиллям у галузі електроніки, оптики,

інформатики, накопичення енергії тощо. Удосконалення таких технологій, як Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) [15], інерціальні вимірювальні блоки (ІВБ) [16], системи виявлення та визначення дальності світла (ЛіДАР) [17], радіолокаційні станції із синтезованою апертурою (РСА) [18], датчики зображення [19] та робототехніка (БПЛА) [20], сприяло розвитку технології БПЛА. БПЛА дозволяють здійснювати польоти у важкодоступних та недоступних районах, уникаючи ризику для екіпажів пілотованих літальних апаратів.

Перші спроби безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розпочалися під час Першої світової війни, коли компанія Dayton-Wright Airplane Company винайшла безпілотну авіаційну торпеду, яка вибухала б у заданий час. У 1917 році відбувся перший політ автоматичного літака Hewitt-Sperry, також авіаційної торпеди, яка доставляла вибухівку до цілі. Під час Другої світової війни з'явився перший великосерійний серійний безпілотник від Reginald Denny Industries. Вони виготовили майже 15 000 безпілотників для армії США для навчання зенітників. McDonnell побудувала мішень з імпульсним реактивним двигуном TD2d-1 Katydid.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) зазвичай класифікуються на шість функціональних категорій: цілі та приманки, розвідувальні, бойові, логістичні, дослідницькі та розробницькі, а також цивільні та комерційні. Цивільні та комерційні БПЛА використовуються операторами для таких застосувань, як професійна фотографія та відеозйомка, інспекція інфраструктури, точне землеробство тощо. Ця галузь також включає застосування, пов'язані з правоохоронними органами та надзвичайними ситуаціями. Типова класифікація за вагою літальних апаратів поділяє їх на мікролітальні апарати (вагою менше 1 кг), мініатюрні БПЛА (менше 25 кг) та важчі БПЛА. Однак існують й інші класифікації.

Залежно від аеродинамічного принципу польоту, їх класифікують як літальні апарати з фіксованим крилом або гвинтокрилі.

БПЛА з фіксованим крилом мають заздалегідь визначений аеродинамічний профіль, який робить політ можливим завдяки створенню підйомної сили, спричиненої поступальною швидкістю БПЛА. Керування БПЛА здійснюється за допомогою поверхонь, вбудованих у крило (елерони, рулі висоти та кермо напрямку). Вони дозволяють БПЛА розвертати кути тангажу, крену та

риськування. Руль висоти керує тангажем, елеронами – креном, а кермо напрямку – риськуванням.

Гвинтокрилі БПЛА складаються з кількох лопатей ротора, що обертаються навколо нерухомої щогли. Аеродинаміка лопатей ротора подібна до аеродинаміки лопатей ротора; однак літальний апарат може зависати, і для створення підйомної сили не потрібен рух вперед. Самі лопаті перебувають у постійному русі, що створює повітряний потік, необхідний для створення підйомної сили. Керування роторним БПЛА здійснюється за рахунок зміни тяги та крутного моменту від роторів. Наприклад, рух по рисьханню використовує дисбаланс, що виникає в силах осі рисьхання, що виникають внаслідок збільшення/зменшення швидкості пари діагональних двигунів. Багатороторні БПЛА класифікуються залежно від конфігурації ротора на трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери. З точки зору надійності, квадрокоптери не мають можливості посадки, якщо один двигун вийде з ладу, тоді як гексакоптер може вижити з обмеженим контролем рисьхання, а октокоптери можуть літати та приземлятися з відмовою одного двигуна.

Гвинтокрилі БПЛА дозволяють переносити більше корисного навантаження, легше злітати та посаджуватися, краще маневрувати, ніж БПЛА з фіксованим крилом, та мають можливість зависання. Однак БПЛА з фіксованим крилом мають простішу структуру, менш складне обслуговування, ефективну аеродинаміку, а також більшу тривалість польоту та охоплення дальності. Час польоту гвинтокрилих БПЛА майже ніколи не перевищує 30 хвилин з електродвигунами, тоді як у БПЛА з фіксованим крилом він може легко перевищити 60 хвилин. Корисне навантаження понад 3 кг є поширеним явищем у гвинтокрилих БПЛА. Однак, цю специфікацію ваги корисного навантаження важче досягти у БПЛА з фіксованим крилом. Безпілотні літальні апарати з фіксованим крилом частіше використовуються для моніторингу великих полів, лісів або лінійної інфраструктури (доріг або залізниць). З іншого боку, гвинтокрилі безпілотні літальні апарати зосереджені на таких застосуваннях, як інспекція інфраструктури (мостів, дамб або вітряків), моніторинг невеликих полів та обприскування.

Окрім автономного програмного забезпечення, SwRI може інтегрувати корисні навантаження, модифікувати апаратне забезпечення літального апарату та використовувати власний досвід SwRI в галузі датчиків для створення індивідуальних рішень для дронів, що охоплюють широкий спектр застосувань для наших клієнтів. Наші галузеві застосування включають наступне:

- Оборона – Дрони, керовані солдатами, стали революційною технологією для невеликих підрозділів. Але необхідність пілотування людиною та моніторингу відеопотоків виводить солдата з бою, збільшуючи, а не зменшуючи кількість робочої сили, необхідної для розгортання «безпілотних» систем. SwRI розробляє технології, завдяки яким дрони поведуться більше як надійний член команди, здатний діяти правильно та з мінімальним втручанням оператора, а не як обладнання, яке потрібно експлуатувати. Ми можемо модернізувати дрони, щоб вони могли виконувати складні місії. А як незалежна некомерційна організація, ми незалежні від апаратного забезпечення та не маємо обмежень щодо постачальників. Наскільки дозволяють технології, ми працюватимемо з вашим бажаним обладнанням, корисним навантаженням та інтерфейсами для створення нових можливостей.
- Промислова інспекція – Технологія дронів допомагає промисловим користувачам краще контролювати та керувати своїм обладнанням, спорудами та інфраструктурою. Наша технологія може підвищити ефективність та результативність інспекційних операцій завдяки автоматизації, дозволяючи дронам пересуватися просторами, до яких важко або небезпечно дістатися людям.
- Пошуково-рятувальні роботи – наш програмний стек автономності дозволяє дронам досліджувати внутрішні простори, виявляти та знаходити персонал, небезпечні матеріали та інші об'єкти, що становлять інтерес. Нещодавно ми продемонстрували нашу технологію на атомній електростанції, де наші дрони змогли досліджувати внутрішні простори та знаходити джерела радіації, і все це без допомоги людини-пілота.

Безекіпажні наземні комплекси (БеНК), роботизовані бойові машини або автономні транспортні засоби, як би ви їх не називали, все частіше розробляються, прототипуються та випробовуються для майбутнього використання в автономних та командних операціях або сценаріях з пілотованими транспортними засобами.

Наземні системи без екіпажу (ПГС) можна розрізнити за двома основними характеристиками: (а) розміром і вагою та (б) типом пересування. Вони можуть варіюватися від маленьких портативних моделей до великих моделей розміром з танк, тоді як їх типи пересування в основному включають моделі на колесах, гусеницях і ногах. Ці характеристики впливають на можливості системи, такі як тип місцевості, до якої вона найкраще підходить, її швидкість і здатність перевозити значне корисне навантаження, а також на те, які завдання вона найкраще підходить для виконання. Загалом, цивільні ПГС, як правило, менші, ніж військові ПГС.

Обмеження, з якими стикаються UGS через проблеми з мобільністю та залежність від GNSS, що впливає на їх здатність працювати в середовищах, де GNSS заборонено, обмежили їх використання. Таким чином, ПГС становлять незначну загрозу міжнародній безпеці, особливо порівняно з їхніми повітряними еквівалентами. Проте зростає зацікавленість у розробці та розгортанні ПГС у військовій сфері, що в майбутньому може призвести до того, що ці системи стануть більшою загрозою для міжнародної безпеки.

ПГС стикаються з кількома технічними проблемами, які перешкоджають їх більш широкому використанню. Постійні вдосконалення включають пересування та рушійну силу для покращення їх зручності використання та витривалості, а також датчики, штучний інтелект та обчислювальну потужність для забезпечення навігаційної автономності.

Універсальної класифікації ПГС не існує. ПХГ можна диференціювати залежно від того, озброєні вони чи ні, а також за такими характеристиками, як розмір і вага. Наприклад, системи можуть варіюватися від маленьких портативних моделей до великих моделей розміром з резервуар. Іншою характеристикою, за якою можна розрізнити ПГС, є тип пересування. Є три основні типи:

- Колісні: колеса є найбільш енергоефективним типом пересування. Однак колеса менше підходять для бездоріжжя.
- Гусеничний: гусениці добре підходять для використання бездоріжжям, але вони шумні, споживають багато енергії та працюють на низьких швидкостях.
- На ногах: системи на ногах можуть добре маневрувати на пересіченій місцевості. Однак вони, як правило, повільні, вимагають більше енергії, ніж колеса чи гусениці, і механічно складні через потребу в балансі та стабільності. На відміну від колісних і гусеничних систем, які можуть мати різні розміри, нинішні системи на ногах, як правило, малі.

У той час як великі озброєні колісні або гусеничні системи можуть нести значну вогневу міць, озброєні системи можуть нести лише меншу зброю, таку як адаптована стрілецька зброя. Крім того, певні UGVSS можуть поєднувати два типи пересування, такі як колеса та опори, що дозволяє їм охоплювати більш різноманітні місцевості та подолати деякі обмеження, пов'язані з окремими типами пересування.

Хоча існують різні типи ПСГ, загалом такі системи також мають певні характеристики з системами з екіпажем, зберігаючи певні особливості. Системи з екіпажем і без екіпажа не тільки виконують однакові функції, але й мають багато подібних характеристик. До них належать структурні компоненти (наприклад, системи з екіпажем і без екіпажу можуть мати колісні або гусеничні транспортні засоби) і тип технології, що використовується для живлення та навігації цих систем. Деякі технології та області інновацій, які стосуються систем без екіпажа, також можуть застосовуватися до систем з екіпажем - і навпаки. Основні відмінності стосуються того факту, що наземні системи з екіпажем мають водія та екіпаж на борту транспортного засобу, на відміну від UGV, у яких нікого немає. Інші відмінності виникають через цю відмінність, як зазначено нижче. Хоча транспортний засіб може бути відключений, якщо він не є повністю автономним, існують оператори, які контролюють деякі або всі його функції.

Відстань і засоби, за допомогою яких можна керувати ПСГ, а також те, які вхідні дані потрібні від оператора ПСГ, залежать від типу системи, її складності та того, чи є вона військовою чи цивільною системою. У дистанційно керованому ПСГ

оператор зберігає контроль над навігацією системи та реагує на інформацію, що надається датчиками системи. Проте тривають дослідження, спрямовані на те, щоб автономізувати навігацію за допомогою технологічних інновацій у сферах, пов'язаних із комунікаціями та штучним інтелектом, щоб назвати лише деякі з них, щоб ще більше зменшити або навіть усунути роль людей-операторів.

1.2. Інфраструктура роїв БПЛА

Останні досягнення в дослідженнях робототехніки охоплюють керування формуванням кількох БПЛА та ройову робототехніку, які черпають значне натхнення з колективної поведінки, що спостерігається в природних системах, таких як косяки риб, колонії комах та зграї птахів, як показано на рис. 1. Ройова робототехніка означає децентралізовані мережі економічних, нескладних роботів, які демонструють виняткову відмовостійкість, масштабованість та адаптивність. Отже, ці технології особливо підходять для застосування в непередбачених та динамічних умовах. Формування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), широко відомих як дрони, є новою темою в сучасну епоху. Це пов'язано з їх чудовими перевагами, включаючи підвищену довговічність, адаптивність до різних середовищ та гнучкість. Основна мета цього дослідження полягає в покращенні розуміння та ефективності формування кількох БПЛА та ройових роботизованих систем, зосереджуючись на управлінні формуванням та оптимізації планування шляху. Планування шляху суттєво впливає на результати навігаційних завдань, що робить його важливим для оптимізації колективної ефективності ройових систем. Було запропоновано багато стратегій для точного налаштування цієї властивості, але залишається реальним викликом визначити прості та ресурсомісткі методи. Хоча було зроблено багато спроб покращити процес, пошук найкращого способу вирішення проблеми полягає в тому, що враховуючи, що змінні динамічні від клієнта до клієнта, а потреби проекту змінюються з часом, що робить усе разом складною структурою складності. Для досягнення бажаних результатів оптимізації необхідний постійний моніторинг.



Рис.1.1 Біологічна роєва система з повною кооперативною поведінкою

Досягнення в ройовій робототехніці (SR), особливо в галузі повітряної робототехніки, принесли трансформаційні можливості, втілені в роях безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ці рої використовують повітряну мобільність, високошвидкісну маневреність та широкі можливості покриття, що робить їх ключовими в різних застосуваннях [21, 22, 23]. SR прагне розробити масштабовані, надійні системи, де групи роботів співпрацюють один з одним та з навколишнім середовищем для ефективного виконання складних завдань. Натхненні природною соціальною поведінкою, такі системи перевершують аналоги з одним роботом у багатозадачності, масштабованості, економічній ефективності, надійності та адаптивності [24, 25], особливо в літаючих роботах, що потребують скоординованої взаємодії та співпраці між кількома автономними агентами.

Система ройових роботів – це метод координації, що використовується в багатороботних системах (MRS), що складається з групи автономних і відносно простих роботів зі схожими можливостями. Ці роботи оснащені локальними сенсорними та комунікаційними здібностями, що дозволяє їм взаємодіяти локально між собою та з навколишнім середовищем. Така колективна взаємодія підвищує їхню ефективність у виконанні заздалегідь визначених завдань порівняно з окремими роботами [26, 27, 28]. Центральним елементом SR є координація MRS, де автономні повітряні агенти працюють колективно в плануванні шляху, розподілі завдань та управлінні формуванням. Ці агенти, різні за можливостями, але гармонійно взаємодіючи, роблять індивідуальний внесок, отримуючи колективну вигоду від спільного середовища.

Інфраструктура роїв БПЛА складається з кількох критично важливих компонентів, які разом забезпечують ефективну роботу та координацію рою, як

зображено та детально описано на рис. 1 та в таблиці 1.2 відповідно. Кожен дрон або квадрокоптер служить окремим блоком у межах рою, оснащеним датчиками, процесорами та необхідним обладнанням для полегшення зв'язку та координації з іншими дронами. Блок керування відіграє центральну роль в управлінні роєм, забезпечуючи роботу дронів у межах бажаних параметрів. Це керування може здійснюватися через наземну станцію або хмарну систему, що забезпечує центральний інтерфейс для керування, моніторингу та прийому даних.

Таблиця 1.2. Компоненти інфраструктури роїв БПЛА

| Компонент | Опис |
|---------------------|--|
| Дрони/Квадрокоптери | Окремі блоки, оснащені датчиками, процесорами та апаратним забезпеченням для зв'язку та координації |
| Блок керування | Керує роєм, забезпечуючи роботу в межах бажаних параметрів, може включати наземну станцію або хмарну систему |
| Система зв'язку | Бездротова мережа для обміну інформацією в режимі реального часу з використанням таких протоколів, як Wi-Fi, Bluetooth |
| Датчики | Інтегровані датчики (наприклад, камери, LiDAR, GPS) для збору та обробки даних про навколишнє середовище |
| Алгоритми | Алгоритми SI для планування шляху, запобігання зіткненням, контролю формування та прийняття рішень |
| Джерело живлення | Акумулятори або підключені джерела живлення критично важливі для часу польоту та продуктивності |
| Навігаційна система | GPS, інерціальна навігація та візуальна одометрія для автономної навігації та запобігання зіткненням |

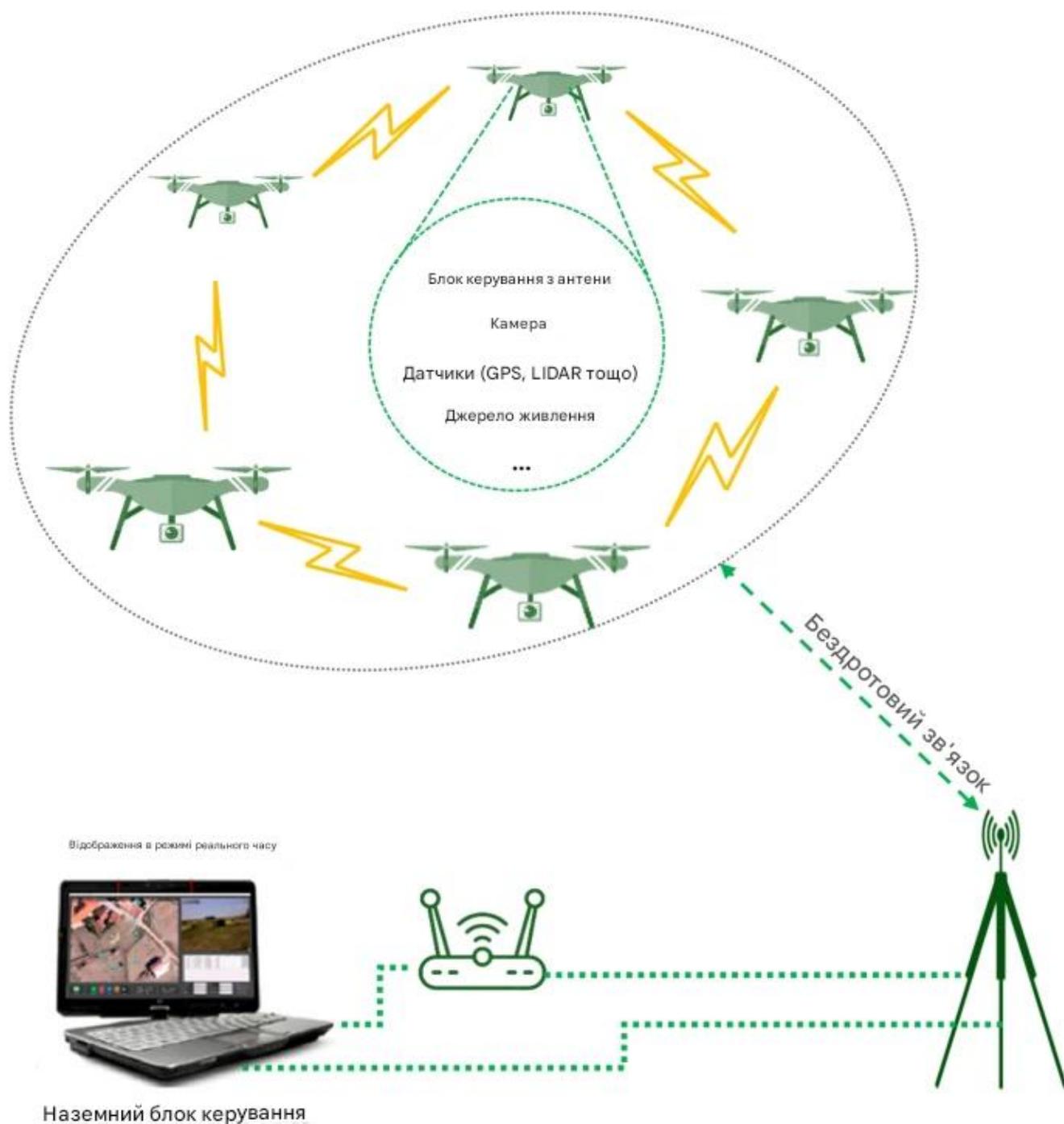


Рис.1.2 Основні компоненти роїв БПЛА

Надійна система зв'язку є важливою для обміну інформацією в режимі реального часу між БПЛА та з наземною станцією керування. Ця система зазвичай використовує бездротові протоколи, такі як Wi-Fi, Bluetooth. Інтегровані датчики, включаючи камери, LiDAR, GPS, акселерометри та гіроскопи, дозволяють дронам збирати та обробляти дані про навколишнє середовище. Алгоритми, особливо ті, що базуються на SI, мають вирішальне значення для автономної координації, включаючи планування шляху, уникнення зіткнень, контроль формування та

прийняття рішень.

Джерело живлення, часто батареї або підключене електроживлення, є критично важливим для роботи БПЛА, впливаючи на час польоту та загальну продуктивність. Зрештою, навігаційні системи, такі як GPS, інерціальна навігація та візуальна одометрія, дозволяють БПЛА автономно орієнтуватися та уникати зіткнень, забезпечуючи ефективну та безпечну експлуатацію.

1.3 Особливості та характеристики роїв БПЛА

Мета розробки складних роботизованих систем, здатних виконувати складні завдання в різних середовищах, зумовлює зростаючий інтерес до MRS. Як підмножина MRS, рої БПЛА пропонують кілька переваг та ключових особливостей.

Порівняно з системою з одним роботом, система SR може виконувати складне завдання за допомогою команди простих, кооперативних роботів, що призводить до зниження витрат на будівництво та обслуговування. В системі з одним роботом конструкція має бути складною та оснащеною кількома модулями керування, що призводить до високих витрат на проектування та вимог до обслуговування. Будь-який збій у будь-якій частині робота може вплинути на ефективність виконання місії [24, 25].

У таблиці 1.3 наведено важливі особливості та характеристики роїв БПЛА. Однією з основних переваг є економічна ефективність. Створення одного, дуже універсального робота може бути непрактичним через обмеження розміру та корисного навантаження. Натомість, використання групи спеціалізованих роботів дозволяє знайти економічно ефективні рішення без шкоди для продуктивності завдань.

Таблиця 1.3. Особливості та характеристики роїв БПЛА

| Функція | Опис |
|---------------------------------|--|
| Економічно ефективність | Використання групи спеціалізованих роботів для різних завдань є більш економічно вигідним, ніж створення одного універсального робота. |
| Масштабованість | Збереження ефективності та продуктивності навіть за збільшення кількості роботів. |
| Міцність та живучість | Підтримка функціональності в несприятливих умовах, переналаштування для пом'якшення наслідків збоїв робота. |
| Адаптивність та гнучкість | Коригування колективної поведінки відповідно до змін навколишнього середовища або нових цілей місії. |
| Паралелізм | Виконання завдань одночасно та незалежно, підвищення продуктивності та ефективності системи. |
| Надмірність та відмовостійкість | Подолання окремих точок відмови шляхом переналаштування роботів, що залишилися, для компенсації збоїв. |
| Багатозадачність | Розподіл завдань на підзадачі для одночасного виконання, що призводить до швидшого виконання місії. |
| Розповсюджуваність | Координація та розподіл завдань на основі індивідуальних можливостей робота, підвищення ефективності та адаптивності. |

Масштабованість – ще одна ключова характеристика, яка дозволяє роям БПЛА зберігати свою ефективність навіть за збільшення кількості роботів. Надійність та живучість стосуються здатності рою функціонувати за несприятливих умов та переналаштовуватися у разі збоїв роботів. Це підвищує надійність рою, особливо в небезпечних або непередбачуваних середовищах.

Адаптивність та гнучкість дозволяють роям БПЛА коригувати свою колективну поведінку відповідно до змін у навколишньому середовищі або цілей місії. Паралелізм дозволяє кільком роботам працювати одночасно та незалежно, значно покращуючи продуктивність та ефективність системи. Така паралельна робота життєво важлива для завдань, що потребують швидкого виконання.

Резервування та відмовостійкість мають вирішальне значення для подолання точок одиночного відмови. Якщо один або декілька роботів виходять з ладу, решта роботів можуть переналаштуватися, щоб пом'якшити вплив, підвищуючи загальну

надійність системи. Багатозадачність передбачає розбиття завдань на підзадачі, які можна виконувати одночасно, що призводить до швидшого виконання місій. Нарешті, розподіленість дозволяє ефективно координувати та розподіляти завдання на основі можливостей окремих роботів. Ця функція підвищує ефективність, масштабованість та адаптивність рою до змінних умов та вимог до завдань.

Управління формуванням у роях БПЛА передбачає координацію кількох літаючих роботів для підтримки певних формацій при досягненні спільної мети. Ця галузь дослідження, що є частиною SR, вирішує проблему координації великих груп відносно простих роботів для виконання складних завдань. Однією з основних проблем у MRS є автоматизація руху та керування командою для злагодженої роботи.

Дослідження в галузі управління формацією зосереджені на розробці стратегій та алгоритмів управління, які дозволяють команді літаючих роботів літати за скоординованими схемами. Це виявилось корисним у різних застосуваннях, таких як спостереження, картографування та пошуково-рятувальні операції. Надійні та масштабовані алгоритми управління є важливими для обробки реальних невизначеностей та збурень, а також для управління зв'язком та обміном інформацією між ройовими роботами [29,30].

Як показано на рис.1.3, керування формуванням шаблонів руху є важливою галуззю досліджень у багатьох робототехнічних системах. Його метою є координація роїв БПЛА для задоволення певних обмежень стану. Замість планування унікальних дій для кожного робота підтримується задана формація, і одна дія керує всією формацією, що значно зменшує обчислювальну складність. Однак для підтримки цих формацій необхідні надійні підходи до керування.

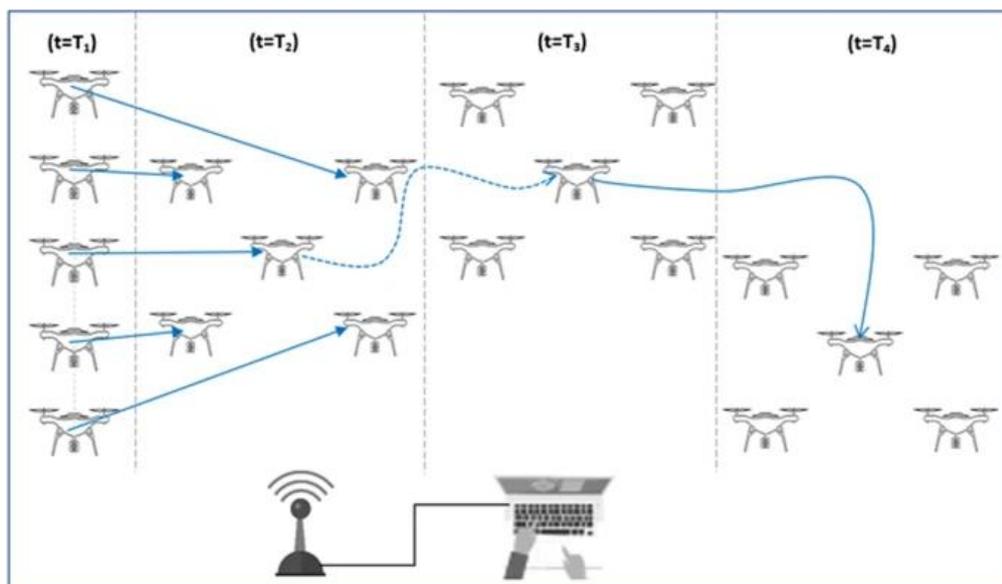


Рис.1.3 Контроль формування рою

Контроль формування є життєво важливим для різних застосувань рою БПЛА. Методи на основі віртуальної структури керують БПЛА за допомогою віртуальної структури, що ідеально підходить для жорстких формацій у спостереженні та картографуванні. Методи «лідер-слідувач», коли певні БПЛА ведуть, а інші йдуть за ними, корисні для слідування точним траєкторіям, наприклад, у пошуково-рятувальних місіях. Методи, засновані на поведінці, які спираються на прості правила поведінки, підходять для динамічних середовищ і завдань, таких як розвідка та збір даних. Ці стратегії забезпечують скоординований рух та ефективність операцій рою БПЛА.

1.4 Галузі застосування роїв БПЛА

Переваги польоту та розподілена поведінка роїв БПЛА дозволяють їм досліджувати, контролювати та збирати дані з великих територій спільним та інтегрованим чином. Ці особливості, разом із розподілом завдань та спільною поведінкою, роблять рої БПЛА дуже універсальними та цінними в різних цивільних та військових застосуваннях, як показано на рис. 1.4.

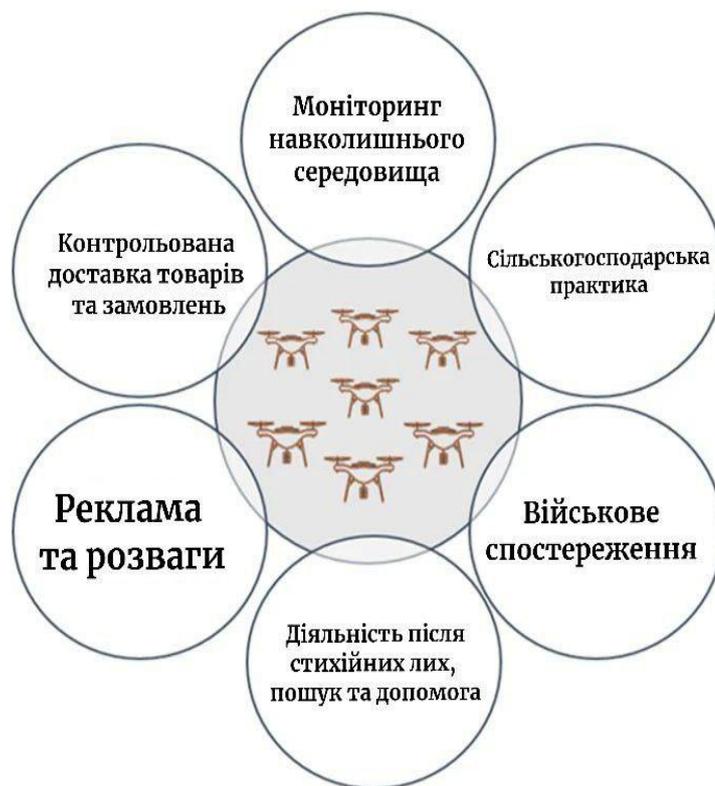


Рис.1.4 Галузі застосування роїв БПЛА

Цивільні застосування:

Автономний моніторинг: рої БПЛА можна запрограмувати для співпраці в програмах точного землеробства, таких як запилення сільськогосподарських культур, моніторинг стану сільськогосподарських культур та ґрунту, а також збір даних про врожайність на великих територіях. Крім того, рої БПЛА все частіше використовуються для моніторингу навколишнього середовища та виявлення забруднення, де вони можуть ефективно охоплювати великі площі та надавати дані в режимі реального часу [31]. Зусилля щодо збереження дикої природи також виграють від роїв БПЛА, оскільки вони можуть контролювати популяції тварин та відстежувати браконьєрство з мінімальним втручанням людини. Інспекція інфраструктури є ще однією важливою сферою, де рої БПЛА можуть інспектувати мости, трубопроводи та лінії електропередач, швидко та точно виявляючи проблеми.

Служби доставки: У логістиці та службах доставки рої БПЛА можуть швидко та ефективно доставляти посилки, скорочуючи час та витрати на доставку [27]. Транспортування медичних припасів – ще одне перспективне застосування, де рої БПЛА можуть доставляти необхідні матеріали у віддалені або постраждалі від

стихійних лих райони, забезпечуючи своєчасну медичну допомогу. Рої БПЛА також відіграють вирішальну роль у сценаріях реагування на надзвичайні ситуації, де вони можуть транспортувати обладнання та припаси рятувальним командам у небезпечних або важкодоступних місцях.

Пошуково-рятувальні операції: У сценаріях після стихійного лиха рої БПЛА можуть бути задіяні для пошуково-рятувальних операцій, де вони допомагають рятувальникам швидко дістатися до небезпечних або важкодоступних районів. Надаючи аерофотознімки та дані в режимі реального часу, рої БПЛА підвищують ефективність рятувальних місій, потенційно рятуючи життя [32].

Розваги та події: рої безпілотників знайшли інноваційне застосування в розвагах та заходах. Світлові шоу дронів, де кілька дронів літають у скоординованих схемах, створюючи візуальні видовища, стали популярними атракціонами. Крім того, рої безпілотників використовуються в рекламі, де вони можуть відображати логотипи та повідомлення в небі, створюючи унікальні та привабливі рекламні акції [27].

Військове застосування:

Рої БПЛА дуже ефективні у військових місіях спостереження та розвідки. Вони можуть патрулювати кордони, контролювати великі території та надавати розвідувальні дані про потенційні загрози в режимі реального часу. Рої БПЛА також можуть виконувати розвідувальні операції, збираючи важливі дані про позиції та переміщення противника, тим самим підвищуючи ситуаційну обізнаність.

У ролях бойової підтримки, рої БПЛА можуть допомагати у визначенні та відстеженні цілей, надаючи точну та своєчасну інформацію наземним силам. Вони також можуть бути задіяні для радіоелектронної боротьби, глушіння комунікацій противника та порушення його операцій. Здатність роїв БПЛА діяти у скоординованих формуваннях робить їх ідеальними для виконання складних місій з високою точністю та ефективністю [33].

У військовій логістиці рої БПЛА можуть використовуватися для транспортування припасів та обладнання до військ на передовій, забезпечуючи стабільний потік ресурсів. Їхня здатність працювати автономно та охоплювати

великі території робить їх ідеальними для управління ланцюгами поставок у складних умовах [33].

Хоча рої БПЛА широко використовуються в різних військових та цивільних сферах, таких як моніторинг екологічних та стихійних лих, прикордонний нагляд, реагування на надзвичайні ситуації, пошуково-рятувальні роботи, доставка вантажів та будівництво [34], їхня колективна спроможність значною мірою залежить від обміну інформацією між БПЛА. Під час виконання місій рої БПЛА залежать від надійних каналів зв'язку для контролю формування, планування маршруту, розподілу завдань та спільного планування, що забезпечує обмін інформацією та скоординовані операції між великомасштабними БПЛА.

За сучасних технологічних умов, рої БПЛА все ще значною мірою залежать від зв'язку в режимі реального часу. У практичних місіях їм потрібен зв'язок у режимі реального часу з платформою керування через телеметричні канали, а БПЛА також покладаються на стабільні канали зв'язку для обміну інформацією один з одним. Існуючі методи зв'язку для роїв БПЛА включають переважно Wi-Fi, Zigbee, 5G, супутниковий зв'язок та оптичний зв'язок. Якщо БПЛА працює в електромагнітно складному середовищі, такому як атомна електростанція, промислова зона, міське середовище або густонаселена зона зв'язку, зазвичай існують різні джерела електромагнітного випромінювання зі значними відмінностями в інтенсивності випромінювання, щільному розподілі сигналу та різноманітних формах сигналу. БПЛА, що використовують такі методи зв'язку, як Wi-Fi, Zigbee та 5G, вразливі до електромагнітних перешкод, які можуть перешкоджати спільному командуванню та обміну інформацією, що зрештою призводить до зриву місії. У сценаріях аварійно-рятувальних робіт, таких як землетруси, повені або хімічні вибухи, наземна інфраструктура стільникової мережі часто пошкоджується або порушується, що перешкоджає надійному зв'язку в суворих умовах. В результаті, зв'язок за допомогою БПЛА поступово став важливим рішенням для підтримки наземних мереж зв'язку в надзвичайних ситуаціях. Традиційний зв'язок БПЛА спирається на радіочастотний (РЧ) зв'язок, але через обмежену пропускну здатність та схильність до електромагнітних перешкод цей підхід є недостатнім для задоволення потреб сучасних роїв БПЛА,

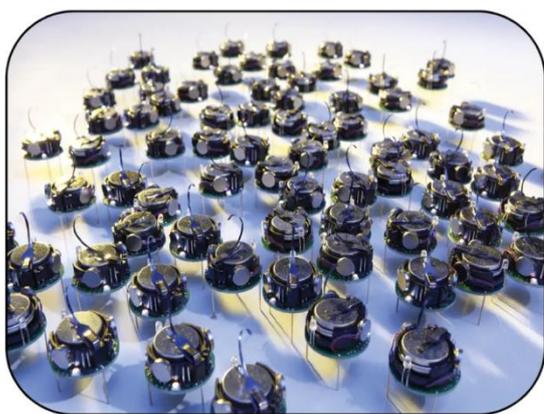
що виконують місії.

Для інтелектуальних спільних місій БПЛА у складних електромагнітних середовищах у цій статті досліджується застосування роїв дронів та проводиться порівняльний аналіз існуючих методів зв'язку з БПЛА. Після оцінки характеристик оптичного зв'язку розроблено та запропоновано систему оптичного зв'язку з певним кутом розбіжності, а її доцільність для впровадження рою дронів продемонстрована як теоретично, так і експериментально.

Ця технологія оптичного зв'язку пропонує кілька переваг, включаючи високу швидкість, широку пропускну здатність, надійні можливості захисту від перешкод та чудову конфіденційність. Ця технологія не тільки зменшує залежність від наземних командних та диспетчерських центрів, але й ефективно усуває обмеження традиційних радіочастотних каналів передачі даних з точки зору пропускну здатності, стійкості до перешкод та безпечної передачі. БПЛА мають високу мобільність та масштабованість. Коли стільникова мережа перевантажена або виходить з ладу, БПЛА можуть служити базовими станціями зв'язку, ефективно доповнюючи традиційні стаціонарні мережі та надаючи тимчасові послуги зв'язку. БПЛА, що використовують технологію оптичного зв'язку, мають чудову мобільність, низьку вартість, швидке розгортання, потужні можливості захисту від перешкод, чудову безпеку та приховування. Вони не обмежені наземною стаціонарною інфраструктурою та можуть функціонувати як мобільні ретранслятори, особливо в екстрених ситуаціях, де вони можуть ефективно доповнювати обмеження стаціонарних супутникових ретрансляторів. Оскільки ці переваги продовжують з'являтися, БПЛА, що використовують технологію оптичного зв'язку, готові стати дуже перспективним рішенням для побудови гнучких авіаційних магістральних мереж зв'язку.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) виникли з військового застосування, що стало новою тенденцією в інших секторах – як оборонних, так і необоронних видах, таких як будівництво, картографія, а також пошуково-рятувальна служба. Здатність позиціонувати БПЛА в таких формаціях, таких як квадрати або трикутники, є вирішальною для цих застосувань, оскільки для підтримки операційної ефективності та стабільності потрібні ще точніші стратегії керування. Це один з

найважливіших аспектів, який сьогодні набагато більше цікавить дослідників у формаціях на основі поведінки, лідер-слідувач та віртуальний лідер. Тим не менш, застосування цих стратегій не є безпроблемним. Підхід «лідер-слідувач» обмежений недосконалістю систем зворотного зв'язку та керування; з іншого боку, схема віртуального формування може погіршити свою продуктивність через втрату одного БПЛА з групи. Зв'язок з новими апаратами досліджено на рис. 2. Планування шляху є важливим питанням для підвищення загальної продуктивності ройової робототехніки, де кілька роботів повинні співпрацювати для виконання складного завдання. Через природу децентралізованих систем, масштабованість та надійність методів планування шляхів стали дуже важливими для гарантування того, що сукупна поведінка рою дасть очікувані результати. Ройові системи мають особливі переваги в динамічних контекстних застосуваннях, де звичайні системи управління централізованого характеру можуть вийти з ладу через свою притаманну адаптивність та відмовостійкість. На рис. 2 зроблено спробу проілюструвати рій на основі безпілотних наземних транспортних засобів (НПТ) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА).



(а) Кількість безпілотних літальних апаратів ілюструє закономірність ройових автономних систем



(б) Представляє собою кілька безпілотних літальних апаратів, що демонструють колективну поведінку в повітрі, щоб продемонструвати чіткий огляд ройових безпілотних літальних апаратів

Рис. 1.5 Ілюстрація автономних наземних та повітряних систем рою

1.5 Міркування щодо безпеки та конфіденційності

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), зазвичай відомі як дрони, отримали широке впровадження в різних галузях промисловості, включаючи логістику, сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища, а особливо у сфері спостереження та оборони. Їхня здатність забезпечувати ситуаційну обізнаність у режимі реального часу, у поєднанні з їхньою здатністю досягати небезпечних або важкодоступних зон, зробила їх незамінними інструментами в сучасних операціях спостереження. Однак, оскільки розгортання дронів збільшується, особливо у критично важливих сферах, захист цих систем від потенційних кіберзагроз став важливою вимогою.

Зі швидким розвитком та широким застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) питання безпеки мережі рою БПЛА стало важливим. Для захисту безпеки мереж рою БПЛА вирішальним є ефективні заходи захисту мережі. Одним з ключових аспектів є оцінка та моніторинг стану безпеки мережі. Однак більшість існуючих досліджень зосереджені на безпеці окремих БПЛА або виявленні конкретних атак, що не забезпечує проактивного захисту мережі.

Першим дослідженням, яке розглядало проблеми безпеки в FANET, було [35], яка не лише підсумувала запропоновані дослідження щодо безпечного зв'язку в FANET, але й навела деякі приклади рішень безпеки, запропонованих для MANET. Однак, оскільки це було одне з перших досліджень-оглядів, воно складалося лише з обмеженої кількості початкових рішень безпеки, запропонованих у літературі, і більшість цих досліджень були запропоновані для MANET. Аналіз існуючих механізмів безпеки, запропонованих для MANET та VANET, був представлений як одна з відкритих областей досліджень [35].

Аналогічно, [36] зосереджувалася на вимогах безпеки протоколів маршрутизації для БПЛА, а також була першим дослідженням, яке розглядало цю область з точки зору вразливостей та мережевих атак. Атаки розглядаються відповідно до трьох фаз протоколів маршрутизації: виявлення маршрутизації, обслуговування маршруту та пересилання даних. Для контрзаходів безпеки обговорювалися системи, засновані на криптографії та довірі, а також системи виявлення вторгнень. Аналогічно, вразливості систем зв'язку БПЛА, ризики,

пов'язані з передачею та обробкою даних, та необхідність безпечних протоколів зв'язку обговорювалися в [37]. Ще одне опитування [38] розглянуло проблеми безпеки FANET, а також моделі зв'язку та мобільності FANET. Однак, не було надано конкретної класифікації загроз для FANET або БПЛА. У дослідженні обговорювалася обмежена кількість рішень безпеки, і було наголошено, що традиційні підходи до безпеки не застосовні безпосередньо до FANET через їхню затримку та важкі обчислення [38].

У [19,20,21,22] автори представили потенційні загрози для систем БПЛА, але безпека FANET не була розглянута. У [39], атаки на основі систем БПЛА були коротко описані з оглядом, а потім автори зосередилися на системах заряджання та атаках на акумулятори, а також на відповідних контрзаходах. Однак, оскільки атаки на споживання енергії з акумуляторів БПЛА є новими атаками, було зазначено, що в літературі немає усталених рішень безпеки. Поряд з цим питанням, ефективні системи виявлення та системи безпеки зі штучним інтелектом також були виділені як відкриті дослідницькі питання в [39].

Жі та ін. ал. [40] обговорили загрози для систем БПЛА, розділивши їх на три групи: сенсорні, комунікаційні та багатофункціональні БПЛА. Безпеці Wi-Fi приділялося значне значення, оскільки більшість БПЛА потребують підключення до Wi-Fi для дистанційного керування. Крім того, дослідження показало, що атаки на сенсорні пристрої значною мірою впливають на поведінку БПЛА, оскільки БПЛА отримують допомогу від таких датчиків, як гіроскопи, для забезпечення балансу та датчиків компаса для визначення напрямку. Однак, порівняно з іншими опитуваннями, дослідження містило лише обмежену кількість атак.

У [41], атаки, що перешкоджають безпечній оцінці місцезнаходження дронів, аналізуються та класифікуються на два основні класи: атаки помилок локалізації та інші атаки. Крім того, автори обговорили методи аналізу безпеки, включаючи інструменти та методи перевірки безпеки. У [42], без надання конкретної класифікації, розглядаються деякі атаки на БПЛА, такі як DoS, атаки типу «людина посередині» та деаутентифікація, а також представлено, як ці атаки використовують вразливості різних застосувань БПЛА. Автори обговорюють застосування машинного навчання, блокчейну та підходів на основі SDN для

забезпечення безпеки лише БПЛА, а не FANET.

У [43,44,45] обговорювалися вимоги безпеки, вразливості та питання конфіденційності БПЛА, включаючи як фізичні, так і кіберзагрози. У [43], автори провели короткий огляд архітектури та комунікаційної структури БПЛА, а також узагальнили існуючі контрзаходи для вирішення проблем безпеки. Вони надали детальне пояснення контрзаходів безпеки для цивільних, урядових та військових БПЛА. Крім того, вони розглянули мережеві, комунікаційні, інформаційні та судово-медичні рішення безпеки, що застосовні до всіх типів БПЛА. Однак, оскільки вони зосередилися на контрзаходах, область потенційних атак була розглянута лише коротко.

У були розглянуті лише питання безпеки та конфіденційності цивільних дронів [44], та наголосили на вразливостях, спрямованих на перехоплення контролю польоту та посадки. З цієї причини автори розділили кібератаки на дві групи: атаки на станції управління польотом та базові станції, а також атаки на канали передачі даних. Зосереджено увагу на майбутніх темах досліджень зв'язку БПЛА, зокрема на системах безпеки та виявлення FANET. В іншому нещодавньому опитуванні [45], атаки, спрямовані на мережі БПЛА, були класифіковані на фізичні та логічні. Це опитування надало широкий огляд, класифікуючи всі нефізичні атаки в межах логічної категорії. Однак уточнення класифікації цих атак є критичним кроком до впровадження ефективніших рішень безпеки для мереж БПЛА.

Нещодавнє опитування [46] класифікували загрози на вісім груп відповідно до векторів атаки (фізичні, шкідливе програмне забезпечення, сенсорні, комунікаційні, мережеві, ланцюги поставок, дефекти захисту, різні) та представили відповідний аналіз прогалін. Інше дослідження [47] використовує модель загроз STRIDE для подальшої категоризації та оцінки ризиків безпеки БПЛА за різними векторами атак. Цей підхід об'єднує обговорення методів автентифікації, безпеки фізичного рівня та прихованого зв'язку, забезпечуючи єдину основу для розуміння того, як ці елементи разом підвищують кібербезпеку БПЛА. Крім того, у цій статті розглядаються ретрансляція та оптимізація траєкторії, які зосереджені на оптимізації маршрутів зв'язку та траєкторій польоту для підвищення як ефективності зв'язку, так і стійкості мережі.

В іншому нещодавньому опитуванні [48], проблеми безпеки поділено на чотири групи: рівень датчиків, рівень обладнання, рівень зв'язку та рівень програмного забезпечення, а потім всебічно проаналізовано контрзаходи, вжиті проти кожного типу атаки в літературі. Крім того, загрози конфіденційності також були розглянуті у трьох класах: індивідуальні ризики, організаційні ризики та ризики БПЛА. На відміну від інших опитувань, у дослідженні також розглянуто основні характеристики БПЛА в розділах апаратного забезпечення, програмного забезпечення, датчиків та зв'язку. У цьому відношенні це опитування стало гарною основою для нових дослідників. Однак їхній огляд FANET з точки зору безпеки та потенційних рішень для них був дуже коротким.

Аналогічно, в [49], проблеми безпеки були розділені на три групи на основі критичних компонентів БПЛА: апаратне забезпечення, програмне забезпечення та зв'язок. Однак, на відміну від [48], для кожної категорії обговорювалося менше атак, і ці атаки окремо не пояснювалися детально. Були розглянуті новітні технології захисту; проте це дослідження не розглядає атаки на сенсорні пристрої та не окреслює заходи проти таких атак. Отже, це дослідження пропонує загальний огляд, а не всебічний аналіз.

У [50], загрози, спрямовані на БПЛА, були розділені на чотири групи: мережеві, програмні, корисне навантаження та інтелектуальна безпека. На відміну від інших досліджень, це дослідження стосується атак, спрямованих на інтелектуальні рішення безпеки для БПЛА. У дослідженні розглядаються атаки, спрямовані на використання алгоритмів на основі машинного навчання шляхом маніпулювання даними або створення шкідливих зразків. Однак, у ньому не обговорюються контрзаходи для цих конкретних атак, а також було представлено обмежену кількість атак для інших категорій.

Один із вичерпних оглядів літератури був наведений у [51]. У дослідженні не лише оцінювалися можливі загрози для БПЛА відповідно до різних типів з'єднань та вузлів, але й зосереджувалося на маршрутизації, характеристиках, конфіденційності зв'язку та безпеці FANET. У цьому дослідженні представлені рішення безпеки шляхом класифікації загроз та рішень безпеки для FANET відповідно до чотирьох груп рівня OSI. Однак, як зазначають автори, деякі

нещодавні дослідження, пов'язані з програмно-визначеними мережами (SDN), машинним навчанням та технологіями 5G, не були включені. Крім того, у дослідженні не обговорюються атаки на основі апаратного забезпечення.

2 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ РОЗВІДУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ РОІВ БПЛА

2.1 Технічні характеристики та можливості

Робототехнічні та автономні системи (RAS): RAS є прийнятим терміном в академічних колах та науково-технічної (S&T) спільноти та висвітлює фізичні (роботизовані) та когнітивні (автономні) аспекти цих систем. RAS — це структура для опису систем як з роботизованим елементом, так і з автономним елементом.

Важливо відзначити, що кожна з послідовних частин RAS охоплює широкий спектр. Частина «системи» відноситься до різноманітних фізичних систем у широкому діапазоні (у нашому випадку: військових) сфер застосування. Автоматизовані програмні системи, що працюють на комп'ютерах або в мережах, включаючи «ботів», частини програмного забезпечення, які можуть виконувати команди без втручання людини, не кваліфікуються як RAS, оскільки в них відсутній фізичний компонент. «Роботизована» частина, яка відноситься до фізичного компонування системи, передбачає, що система є безпіотною або нежилою. Усі інші фізичні аспекти (розмір, форма, чи він літає, плаває чи котиться тощо) залишаються відкритими. «Автономна» частина, яка відноситься до когнітивного дизайну системи, охоплює весь діапазон від повністю керованого віддаленим оператором-людиною до повністю контрольованого внутрішньою логікою, тобто «програмою» або «програмним забезпеченням», яке визначає поведінку системи. У військовому контексті важливо відрізнити загальну категорію RAS від набагато меншої категорії летальних автономних систем зброї (LAWS).

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та безпілотні наземні транспортні засоби (НПТ) – це типи безпілотних систем, що використовуються для різних військових, комерційних та цивільних застосувань, але вони працюють у різних сферах та мають різні характеристики та можливості (див. табл. 2.1).

| Назва | Характеристика |
|--|---|
| Безпілотний транспорт «Фантом» | <p>повна маса - 1000 кг</p> <p>корисне навантаження - до 350 кг</p> <p>колiсна формула – 6х6;</p> <p>незалежна пiдвiска;</p> <p>довжина – 3 м;</p> <p>ширина – 1,6 м;</p> <p>висота – 0,91 м;</p> <p>запас ходу – 20 км;</p> <p>швидкiсть – 38 км\год;</p> <p>озброєння – 12,7-мм кулемет;</p> <p>прицiльна дальнiсть стрiльби – 1000–2000 м;</p> <p>обслуга – водiй i стрiлець</p> |
| Український наземний дрон "Мисливець" | <p>габарити: довжина 2 м, висота 0,7 м, ширина 1,25 м.</p> <p>швидкiсть: 0-10 км/год.</p> <p>двигун: електричний, 6 од * 800 Вт.</p> <p>запас ходу: 15-20 км (в залежностi вiд поверхнi)</p> <p>час автономної роботи без пiдзарядки (в статичнi): 36 год.</p> <p>Радiус вiдеоконтролю та управлiння: 1,5 км (опцiонально - 3 км)</p> <p>канал управлiння та передачi даних: цифровий, захищений</p> <p>може рухатися по водi</p> <p>кiлькiсть камер - 3: 2 камери управлiння, 1 камера прицiлювання</p> <p>оснащений тепловiзором</p> <p>має iнфрачервоне пiдсвiчування для руху в темрявi</p> <p>озброєння: НСВТ 12,7 (має додаткову можливiсть оснащення АГС, ПТРК, ПКТ)</p> |
| Бойова роботизована платформа «ЛАСКА» | <p>Колiсна формула: 4х2</p> <p>Силовий агрегат: одноциліндровий 4-тактний двигун</p> <p>Потужнiсть агрегату: 19 к.с. (14 кВт)</p> <p>Напруга бортової мережi: 12 В</p> |

| | |
|--|---|
| | Матеріал платформи: сталь Ступінь захисту поворотної платформи: > IP65 Розмір (ДхШхВ): 1895x1069x1350 мм База, мм 1 199 Кліренс: 136 мм Запас ходу: 100 км Максимальна швидкість: 80 км/год Маса: 310 кг |
|--|---|

Поява FPV-дронів на полі бою послужила заміною раніше поширеним дронам-бомбардувальникам DJI Mavic, які виявилися проривною технологією в галузі спостереження, але були занадто дорогими для використання в ударних місіях.

Україна зараз намагається збільшити власне виробництво деталей для складання та будівництва безпілотників. Однак, оскільки більшість компонентів надходять з цивільного ринку, ці деталі зазвичай мають дуже малий радіус дії сигналу, що є слабкістю великої кількості військового електронного обладнання через використання ворогами засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Високоякісне обладнання радіоелектронної боротьби вимагає високої потужності та, відповідно, більш громіздкого обладнання, що сприяло створенню компактних систем радіоелектронної боротьби, які зараз використовуються багатьма військами. Потужні засоби радіоелектронної боротьби здебільшого встановлюються на бронетехніку та інший військовий транспорт (див. табл.2.2).

Таблиця 2.2. Бойові дрони, або безпілотні бойові літальні апарати (ББЛ)

| Назва | Характеристика |
|----------------------------|--|
| БПАК А1-С/А1-СМ «Фурія» | Оперативний радіус: до 50 км Час польоту: близько 3 год (нормальні метеоумови) Крейсерська швидкість: 65 км/год Максимальна швидкість: 130 км/год Дальність польоту: до 200 км |

| | |
|-------------------|---|
| | <p>Режим польоту: ручний, напівавтоматичний, автономний</p> <p>Практична стеля: 2500 м</p> <p>Максимальна допустима швидкість вітру: до 15 м/с</p> <p>Спосіб зльоту: еластична або механічна катапульта</p> <p>Спосіб посадки: парашутний (штатно) або по-літаковому</p> |
| БПЛА "Лелека-100" | <p>Габарити повітряного апарата – 1,98 м x 1,14 м,</p> <p>Злітна вага – 4,5-5,5 кг,</p> <p>Максимальна висота польоту – 1500 м,</p> <p>Максимальна швидкість – 120 км/год,</p> <p>Крейсерська швидкість – 60-70 км/год,</p> <p>Час перебування в повітрі – до 4 год,</p> <p>Гарантована довжина маршруту – 100 км,</p> <p>Допустимий спротив вітру – до 20 м/с,</p> <p>Температурний діапазон – від -20°C до +40°C.</p> |
| АСУ-1 «Валькірія» | <p>Загальні:</p> <p>Тип: літаюче крило</p> <p>Матеріали: ЕРР, каркас із карбону, композит</p> <p>Максимальна злітна вага: 3,5 кг</p> <p>Розмах крил: 1,6 м</p> <p>Силова установка:</p> <p>Двигун: електричний</p> <p>Живлення: Li-pol</p> <p>Експлуатаційні показники:</p> <p>Радіус дії: до 34 км</p> <p>Час польоту: близько 120 хвилин (нормальні метеоумови)</p> <p>Крейсерська швидкість: 60 км/год</p> <p>Максимальна швидкість: 108 км/год</p> <p>Практична стеля: 2000 м</p> <p>Спосіб зльоту: автоматичний з рук або леєра</p> <p>Спосіб посадки: автоматична по-літаковому</p> <p>Температура застосування: від -20°C до +40°C</p> |

Технологія дистанційного зондування для моніторингу та фотографування за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) отримала значне визнання за свої можливості спостереження та картографування. БПЛА користуються популярністю завдяки своїй доступності, зручності використання, безпеці для людей та низьким витратам на навчання операторів. Їхні переваги призвели до більшої поширеності в різних ситуаціях, а їхня висока роздільна здатність та надійні функції відстеження сприяють їх широкому впровадженню.

Дрони, що використовують ШІ, зазвичай мають повністю або частково автоматизовані функції. За допомогою ШІ виробники дронів можуть використовувати дані з пристроїв, підключених до дрона, для збору та використання даних про навколишнє середовище та його зовнішній вигляд. ШІ може бути використаний для автоматичного керування дронами, включаючи те, як вони рухаються та навігуються. Для досягнення цього можна використовувати кілька методів, включаючи моніторинг глобальної системи позиціонування (GPS), комп'ютерний зір та алгоритми машинного навчання. Розпізнавання голосу, ідентифікація сцени, виявлення об'єктів та категоризація зображень – це лише деякі з багатьох галузей, де ШІ просувається, особливо коли йдеться про підходи до глибокого навчання ШІ.

Безпілотні літальні апарати бувають найрізноманітнішими, тому назва «дрон» є охоплюючою. Гексакоптери, квадрокоптери, мультикоптери та літальні апарати з крилами – всі вони належать до цієї категорії. Основні типи літаючих дронів такі:

-БПЛА з фіксованим крилом. Безпілотник з фіксованим крилом має одне жорстке крило, яке має виглядати та функціонувати як літак і забезпечує підйомну силу замість вертикальних підйомних роторів. Таким чином, цей тип безпілотника потребує енергії лише для руху вперед, а не для підтримки свого положення в повітрі. Дрони з фіксованим крилом можуть політ на більші відстані, картографувати набагато більші території та залишатися нерухомими протягом тривалого часу, стежачи за своєю ціллю. Ці дрони мають вищу стельову висоту та більшу вантажопідйомність. Дрони з фіксованими крилами можуть бути дорогими. Політ на дронах з фіксованим крилом зазвичай вимагає навчання. Їх можна

використовувати для аерокартографування, інспекції сільського господарства, моніторингу будівництва та багатьох інших застосувань.

- Багатороторний БПЛА. Найпростіший і найдешевший метод «спостереження за небом» – це використання багатороторного дрона. До поширених типів багатороторних літальних апаратів належать трикоптери (з трьома роторами), квадрокоптери (з чотирма), гексакоптери (з шістьма) та октокоптери (з вісьмома). Квадрокоптери є найпоширенішими багатороторними дронами. Вони забезпечують чудовий контроль літака під час польоту. Завдяки покращеній маневреності він може рухатися назад, вперед, вбік та навколо своєї осі. Через низьку витривалість та швидкість багатороторні дрони не підходять для масштабного аерокартографування, довгострокового моніторингу або інспекції інфраструктури на великі відстані, такої як автомагістралі, трубопроводи та лінії електропередач. Вони за своєю суттю неефективні та потребують багато енергії, щоб протистояти гравітації та підтримувати своє положення в повітрі.

- Однороторний БПЛА. БПЛА з одним ротором є міцними та довговічними. За конструкцією та дизайном вони нагадують гелікоптери. Однороторний гелікоптер складається з одного ротора, подібного до великого обертового крила, та хвостового ротора для контролю напрямку та стійкості. Однороторні гелікоптери ефективніші за багатороторні, особливо якщо вони працюють на бензині. Довгі лопаті обертаються як крила, а не як гвинти, що робить однороторний гелікоптер ефективним. Однороторні дрони дорогі та складні. Вони тремтять і менш стабільні або стійкі до невдалої посадки. Через свою технічну складність вони потребують частого технічного обслуговування.

У таблиці 2.3 перераховано потенційні труднощі та завдання, які можуть пришвидшити розвиток БПЛА на базі штучного інтелекту. Крім того, пошук нових способів використання БПЛА зі штучним інтелектом, наприклад, у міському плануванні, відстеженні стану навколишнього середовища та реагуванні на кризові ситуації, має потенціал змінити бізнес та покращити суспільство в цілому. Спільна робота ШІ та БПЛА – це сфера, що розвивається, з великим потенціалом. Постійні дослідження та розробки допоможуть розкрити цей потенціал та вирішити проблеми, що виникають на цьому шляху. У міру того, як технології ШІ

змінюються та розробляються нові моделі, співпраця між наукою та технологіями матиме вирішальне значення для визначення напрямку розвитку БПЛА на базі ШІ та їхнього впливу на наш світ.

Таблиця 2.3. Проблеми та бачення БПЛА на базі штучного інтелекту

| Домен | Виклики | Майбутній обсяг |
|--|---|--|
| Виявлення об'єктів | <ul style="list-style-type: none"> - Виявлення дрібних та рухомих об'єктів - Складність неанотованих даних - Адаптація до різноманітного середовища | <ul style="list-style-type: none"> - Розробка периферійного штучного інтелекту та вбудованої обробки даних - Перенесення знань, специфічних для предметної області - Виявлення об'єктів із урахуванням конфіденційності - Здатність до узагальнення та перенесення знань |
| Спостереження за рятувальною операцією | <ul style="list-style-type: none"> - Обізнаність про ситуацію в режимі реального часу - Навігація у складних умовах - Вантажопідйомність та витривалість - Медична підтримка через штучний інтелект | <ul style="list-style-type: none"> - Штучний інтелект для прогнозування катастроф - Надійна конструкція та резервування - Екстрена допомога та медичне реагування за допомогою штучного інтелекту |

Перевезення вантажів є основним визначеним завданням ПСГ на сучасному етапі розвитку. Це може бути особисте спорядження, таке як бергени, пайки та боєприпаси, або обладнання взводу та роти, таке як драбини чи спорядження для пляжу. ПХГ також можуть бути оснащені носилками, щоб дозволити витягти поранених із небезпечних зон. Евакуація поранених є особливо напруженою роботою для солдатів. Можливість використовувати натомість UGS має багато переваг. Це дозволяє солдатам зберігати енергію в ближньому бою, де втома може призвести до неправильних рішень і подальших втрат. Це також дає солдатам можливість виконувати поставлені завдання, наприклад перемогти у перестрілці. Інше пов'язане з цим використання UGS – це ширше матеріально-технічне забезпечення, особливо в небезпечній «останній милі» для доставки вантажів до прифронтових місць.

UGS може нести радіостанції підрозділу, які можуть бути дуже важкими та повільними в русі. Вони також можуть мати системи радіоелектронної протидії та радіоелектронної боротьби, які можна використовувати для запобігання детонації вибухових пристроїв або для виведення з ладу БПЛА противника. Так само бувають випадки, коли солдати повинні бути відокремлені для формування служби ретрансляції або ретрансляції, якщо радіохвилі заблоковані місцевістю або іншим бар'єром. Це дозволяє підрозділам і штабам спілкуватися один з одним. Це завдання може бути виконане ПСГ із комплектом комунікаційного обладнання.

ПХГ можуть бути оснащені датчиками, які можуть сканувати територію на наявність потенційних загроз. Програмне забезпечення може класифікувати об'єкти в полі зору UGS і визначати точки інтересу, як статичні, так і мобільні. Потім їх можна передати командирам для подальшого дослідження та можливого визначення цілей. Інше використання UGS як розвідувальний екран, що рухається попереду солдатів-розвідників, які спішилися або кінно. Або вони можуть бути використані для виконання статичних чи пересувних функцій навколо підрозділів або баз.

UGS може надати сенсорні можливості для ХБРЯ загроз. ПХГ з відповідними датчиками можуть бути направлені до місць потенційних атак. Так само вони могли залишатися з військами та носити сенсорне обладнання, яке раніше мали мати при собі солдати.

UGS може бути озброєний виносними станціями озброєння. Дистанційне озброєння сьогодні широко використовується на броньованих машинах з екіпажем. Їхня перевага полягає в тому, що вони дозволяють операторам вести вогонь зі зброї зсередини транспортного засобу без необхідності виставляти солдата в башточку. Камери, встановлені на системі, дозволяють оператору наводити систему та підтримувати контроль. Такі системи, наприклад Kongsberg Protector, можуть бути встановлені на ПСГ і управлятися дистанційно силами офсетних військ. Така зброя може використовуватися як сторожовий пристрій або для вогневої підтримки. Іншим потенційним використанням ПСГ є мобільні протипехотні міни, техніка, яку взяли на озброєння українські збройні сили, які воюють проти Росії.

Військово-інженерна частина включає в себе пробивання загороджень, розмінування та забезпечення установки для риття траншей. Зараз це робиться вручну або солдатами за допомогою екскаваторів. Цивільна гірничодобувна промисловість є світовим лідером у безпілотних технологіях, і безпілотні копалки широко використовуються. ПХГ із можливістю копання могли б створити оборонну позицію з набагато меншим людським втручанням, ніж зараз потрібно.

UGS також може бути використаний для забезпечення можливості обману. Це може бути у формі «фальшивих» транспортних засобів чи груп, або вони можуть використовуватися для обману за допомогою електромагнітного спектру. Такі системи навмисно випромінюють, щоб ввести противника в оману. ПХГ, оснащені радіосистемою та антенами, можуть використовуватися для залучення ресурсів противника та маскування намірів і планів.

UGS може бути багатоцільовим і здатним виконувати більше одного з цих завдань одночасно або перемикання між ними. Крім того, ПСГ не варто розглядати в ізоляції. Існують також ПСГ, побудовані як мобільні стартові майданчики для БПЛА, наприклад THEMIS Observe, що є прикладом спільного використання двох технологій. Військова стратегія вимагає диригування оркестром військового потенціалу найбільш прийнятний можливий спосіб. ПСГ слід використовувати для тих завдань, які вони пропонують конкурентна перевага. Вони не повинні бути відповіддю до запитання запитали. Завжди існує небезпека впровадження технологічних інновацій заради себе, особливо в часи, коли зобов'язання випереджають ресурси.

Ознайомившись із ПСГ та пропонованим військовим використанням, цей документ переходить до наступного розділу, щоб відповісти на три запитання:

- Як ПСГ можна реально використовувати сьогодні та в найближчому майбутньому, враховуючи технологічні обмеження та тактичні реалії?
- Як UGS організовано виконання завдань і як вони переміщуються в просторі бою?
- Який найкращий спосіб переконатися, що солдати використовують ПСГ за призначенням?

Солдат повинен залишатися центральним у цих зусиллях. Використання, описане вище, загалом представляє спроби відмовитися від людського впливу, де це можливо. Однак ПСГ створені для підтримки солдатів у їхніх зусиллях, і саме солдати дадуть їм змогу це зробити.

2.2 Значення контролю формування, планування траєкторії та оптимізації

Управління формуванням є життєво важливим в операціях БПЛА, дозволяючи виконувати організовані та ефективні життєво важливі місії. Вони варіюються від управління супутниковою антеною до розвідувальних місій. Управління формуванням дозволить кільком БПЛА літати синхронно для виконання складних маневрів, які окремі підрозділи не могли б виконати. Здатність літальних апаратів утримувати формування підвищує ефективність виконання місій БПЛА. Це означає, що багато льотних підрозділів можуть виконувати такі операції, як спостереження та пошуково-рятувальні операції, де точність та координація мають вирішальне значення. Продуктивність таких формування базується на ефективному процесі проектування маршруту, який покращує навігацію по шляху до визначених цілей, враховуючи умови навколишнього середовища та перешкоди. У ройових роботах планування шляху неможливо уявити без методів оптимізації для підвищення ефективності та результативності. Для покращення таких процесів було розроблено кілька алгоритмів оптимізації; серед них все частіше представлені біологічні алгоритми, такі як оптимізація колонії мурах (АСО). Оптимізація колонії мурах та її варіанти, такі як максимально-мінімальна оптимізація колонії мурах, показали значний потенціал у покращенні швидкості конвергенції та виході з локальних оптимумів, поширених проблем у динамічних контекстах.

Керування формуваннями з кількох БПЛА нещодавно стало суттєвою проблемою в ширшій галузі досліджень БПЛА. Було помічено, що використання численних дронів у визначеному формуванні для певної діяльності або місії підвищує ефективність результатів. Керування формуванням стосується

розташування групи БПЛА, що підтримує визначену конфігурацію, таку як трикутник або квадрат. Потенційні застосування керування формуванням включають різноманітні колективні цілі, такі як пошук та рятування, розвідка, транспортування великогабаритних предметів та управління супутниковими сузір'ями [52-54]. У літературі можна знайти кілька конфігурацій формування та рою [55-57]. Кожен унікальний підхід має свої переваги та недоліки. Один літак функціонує як лідер, тоді як решта літаків слідує за ним. Наприклад, ми застосовуємо підхід «лідер-слідувач». Загалом, цей метод є надійним, за винятком одного недоліку [58], який полягає в відсутності негайного зворотного зв'язку між послідовниками та головним лідером. У деяких дослідницьких роботах, таких як [59], можна спостерігати стратегію, яка застосовується тоді і тільки тоді, коли відома відстань між послідовниками та лідером, тоді як деякі методи не залежать від динамічної моделі [60, 61]. Крім того, якщо хтось реалізує формування віртуального лідера та рій, один з дронів буде вважатися лідером для всіх [62]. Це допоможе у дослідженні стійкості разом із підходом на основі зору для флоту дронів. Читаючи багато дослідницьких робіт, можна знайти узгоджені методи [63], де вони інтегрували метод лідер-слідувач разом із методом віртуального лідера та поведінковим підходом. Алгоритм консенсусу зі скінченим часом для кількох дронів можна вивчити в [64] разом із детальним дослідженням, пов'язаним з підтримкою формації з елементарними даними [65]. Ще одним важливим аспектом, щодо якого не слід йти на компроміс, є затримки зв'язку під час маневрування кількох дронів у рої [66]. У більшості цих досліджень, пов'язаних з формуванням та роїнням, дослідники використовували математику Ляпунова-Красовського для подолання затримок та їх наслідків.

Існує безліч досліджень щодо керування рухом; проте воно залишається недостатнім і потребує додаткового вивчення та управління. Існує необхідність належним чином розглядати розсіяні рівні та їх вплив [67]. Аналогічно, машинне навчання та навчання з підкріпленням вимагають тривалої фази онлайн-навчання та значних наборів даних для офлайн-навчання. Отже, вкрай важливо включити методології штучного інтелекту (ШІ) до протоколів керування. Ще однією проблемою протоколу керування рухом є його стійкість, на яку суттєво впливають

зовнішні збурення [68]. Керування формуванням прагне генерувати сигнали керування, які спрямовують БПЛА на прийняття заданої конфігурації. Архітектура керування рухом, разом з тактикою, розробленою для його отримання, має важливе значення [69]. Керування рухом БПЛА вимагає обміну інформацією всередині їхньої команди; отже, вони використовують комунікаційні структури. Один БПЛА може не мати повної глобальної інформації для всієї місії. Централізована архітектура майже не використовується через свої обмежені обчислювальні та комунікаційні можливості. Децентралізована архітектура є кращою для систем з кількома БПЛА та використовує консенсусні алгоритми для свого проектування. Вона спирається на локальну взаємодію із сусідами, зберігаючи при цьому певний ступінь віддаленості. У цьому обговоренні розглядаються кілька передових методів контролю, які допомагають дослідникам, з висвітленням їхніх відповідних переваг та недоліків, як зазначено нижче:

- Стратегія «лідер-слідувач»: ця стратегія призначає один БПЛА лідером, а решта БПЛА функціонують як послідовники в групі. Деталі місії зберігаються виключно лідером, тоді як наступники переслідують свого лідера в заздалегідь визначених зонах. Основною перевагою цієї методики є її проста та нескладна реалізація. Ця методика схильна до поодиноких збоїв через залежність від лідерства. Це обмеження можна пом'якшити, призначивши багатьох лідерів та віртуальних лідерів.

- Стратегія, заснована на поведінці: Цей метод генерує керуючі сигнали, що враховують багато важливих аспектів місії, шляхом включення численних векторних функцій. Його основною перевагою є виняткова адаптивність до незнайомих середовищ. Недоліком є необхідність математичного моделювання, що ускладнює аналіз стійкості системи.

- Стратегія віртуальної структури: Цей метод передбачає фіксовану конфігурацію для запланованого формування БПЛА. Для досягнення запланованої конфігурації необхідно спрямувати кожен БПЛА до його віртуального вузла. Здатність підтримувати формування та забезпечувати відмовостійкість є його найважливішими перевагами. Цей метод зазнає невдачі, коли виявлення БПЛА в межах формування є помилковим. Компенсація за цей дефектний БПЛА вимагає

перебудови геометрії формування. Цей метод вимагає надійної обчислювальної потужності, що є недоліком цієї стратегії.

2.3 Найсучасніші підходи операцій з використанням роїв БПЛА

Наприклад, у [70] можна знайти підхід до адаптивного керування високого порядку для дронів для боротьби з невизначеностями та зовнішнім шумом. Цей адаптивний алгоритм високого порядку поєднує два різні підходи до керування, такі як керування ковзним режимом з підходом нейронної мережі. Крім того, в огляді літератури можна вивчити [71, 72], щоб дізнатися, як зіткненням запобігали за допомогою алгоритмів глибокого навчання з підкріпленням (DRL). Для усунення подібних обмежень дослідники запропонували математичний підхід Артштейна на основі редукції. Цей підхід також вирішує проблему затримки у взаємодії між агентами. Подібне дослідження, окрім літальних апаратів, було проведено для безпілотних підводних апаратів (UUV) у [73], де вони запропонували метод градієнтного спуску для зменшення проблем затримки. Дослідники також досліджували розподілені підходи до керування з тією ж метою [74].

Дослідники розділили модель на лінійні та нелінійні цикли для кращого керування. В іншому дослідженні [75] для керування роєм БПЛА по круговій траєкторії використовувався зворотний крок. Розроблений метод адаптується до параметрів та вхідних обмежень. Дослідники також вивчають керування формуванням, що спрацьовує за подіями. У дослідженні [76] створюється прогнозна модель, що спрацьовує за подіями, для управління БПЛА. У запропонованій парадигмі БПЛА можуть обмінюватися інформацією лише із сусідніми одиницями, а явища, що спрацьовують за подіями, зменшують обчислювальне навантаження алгоритму. У посиланні [77] використовується гібридний метод для керування роєм БПЛА шляхом покращення придатності. Був використаний PSO з операторами мутантів Коші (CM). Оператори покращують алгоритм PSO, оцінюючи придатність глобальних рішень формування БПЛА. Метод покращує збіжність та швидкість. У [78] вбудовані ієрархії мультихотомії. Кожна з трьох неперекриваючихся колоній має багато БПЛА та лідера. Щоб

створити колонію БПЛА з мультиагентною системою на основі Віксека, автор розробив максимально-мінімальний метод оптимізації колонії мурах (ММАСО). ММАСО обирає найкращу мурашу, MAS обирає лідера колонії, а БПЛА діють як агенти. Крім того, лідери колонії повинні співпрацювати для досягнення спільної мети. Формування БПЛА в парадигмі лідер-слідувач має дві основні конфігурації: послідовник та ромб [79, 80]. Дві конфігурації формування схематично показані на рис. 6. Багато складних структур розвиваються з цих двох стандартних схем розташування.

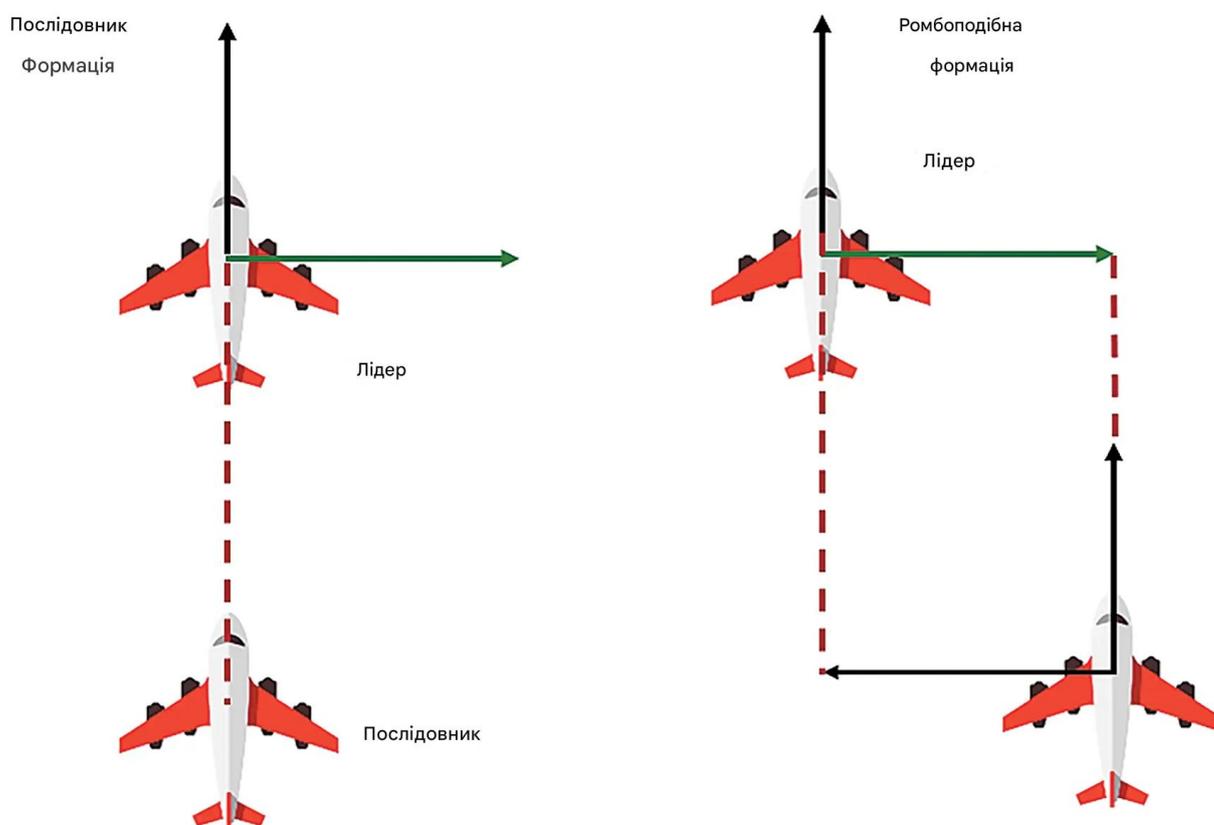


Рис.2.1 Типова конфігурація формування БПЛА

Обидві конфігурації формування мають свої переваги та недоліки [81]. Невелика площа суходолу формування слідувачів зменшує його вразливість до розвідувальних підрозділів та наземних радарів противника, але значно зменшує збір розвідувальних даних. Ромбове формування може охоплювати значну площу, гарантуючи оптимальну видимість для кожного члена команди; воно також може підвищити ймовірність виявлення противником [81]. Дві основні конфігурації формування - це ромбоподібне та слідує формування, з яких можна вивести

кілька популярних формацій БПЛА, таких як форма «плюс» та форма «стрілка». Поширені структури формування показано на рис. 8. Конфігурація дронів суттєво впливає на загальну продуктивність формування. Для підвищення ефективності, мінімізації втрат енергії та зменшення ризиків нові конструкції формування викликають все більший інтерес [82], як видно на рис. 7.

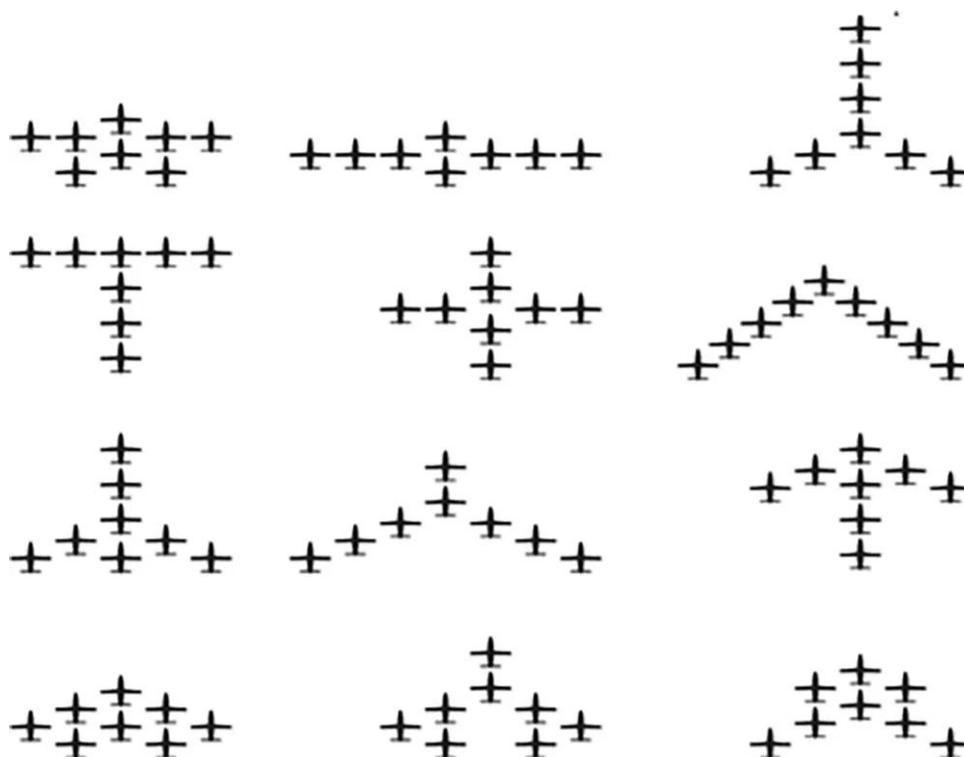


Рис.2.2 Різні конфігурації формування БПЛА

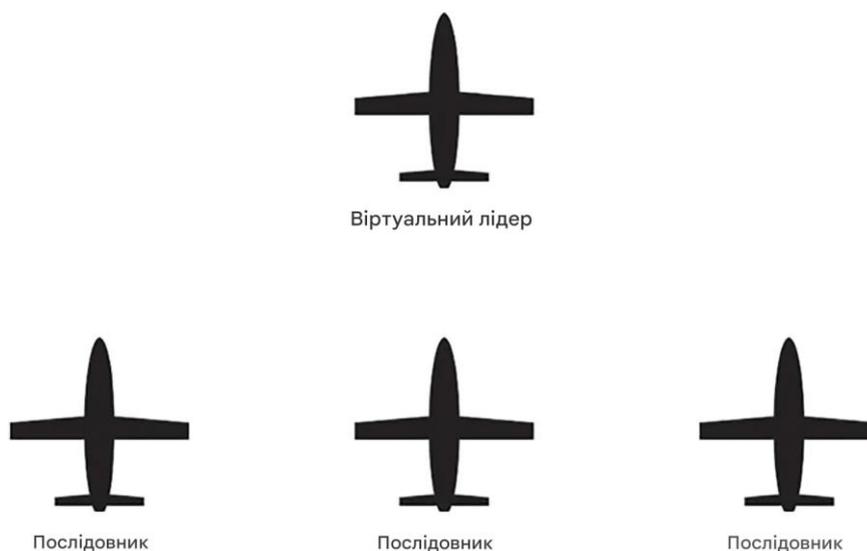


Рис.2.3 Формування лідера (віртуальна топологія)

Структура формування віртуального лідера зменшує затримку зв'язку та навантаження на бортовий процесор [83]. Таким чином, можна додати більше членів формування. Усі члени обмінюються інформацією для підтримки конфігурації формування протягом кількох польотів формування БПЛА. Затримка введення неминуха, коли члени обмінюються інформацією [84, 85]. Ця ситуація значно впливає на стабільність системи, тому вона є актуальною для аналізу проблеми узгодженості системи формування БПЛА із затримками в часі [86, 87]. Топологія зв'язку між лідером-БПЛА та його наступними БПЛА є важливою для підтримки скоординованої поведінки та гарантування ефективного виконання завдань в управлінні формуванням. Парадигма лідер-слідуючий часто залежить від спрямованого графа зв'язку, в якому лідер-слідуючий БПЛА передає своє положення, швидкість та траєкторію своїм послідовникам. Послідовники змінюють свої стани відповідно до інформації, отриманої від лідера, одночасно спілкуючись із сусідніми БПЛА для підтримки формування. Ця архітектура може бути організована як централізована, децентралізована або розподілена, залежно від ступеня зв'язку між БПЛА, причому кожен метод забезпечує різні рівні стійкості, масштабованості та відмовостійкості в динамічних контекстах. Це зображено на рис. 9.

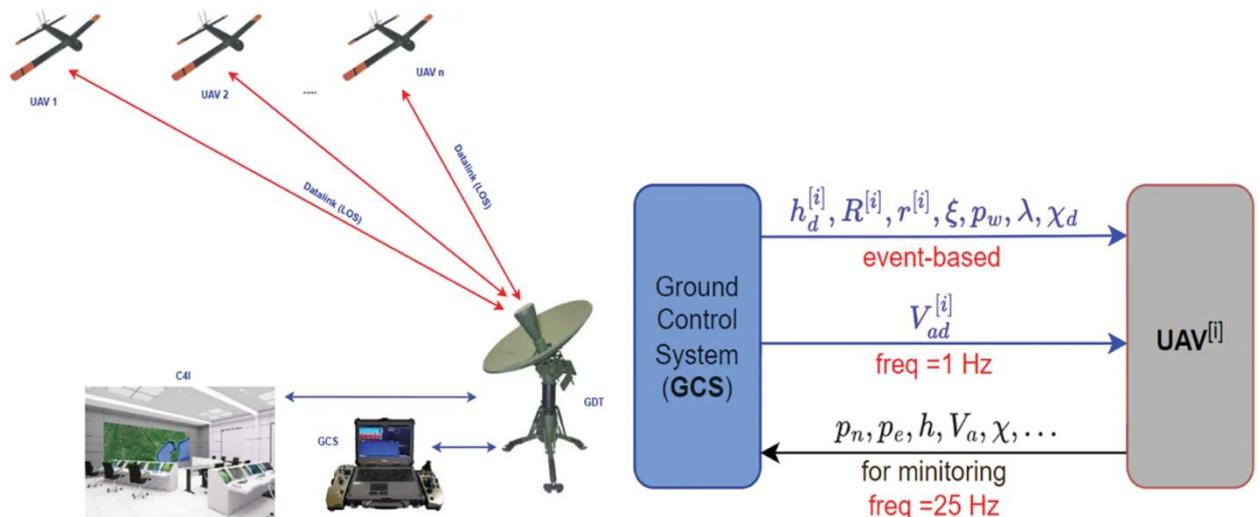


Рис.2.4 Взаємодія між наземною станцією керування (GCS) та БПЛА, а також обмін інформацією та навпаки

Планування шляху є одним із найважливіших питань у ройовій

робототехніці, де кілька безпілотних літальних апаратів виконують спільні завдання. У цьому відношенні ефективне планування шляху відіграє значну роль у ройовій робототехніці, оскільки воно безпосередньо впливає на виконання місії, споживання енергії та ефективність. У ройовій робототехніці основним завданням є розробка шляхів таким чином, щоб підвищити ефективність окремих БПЛА, зберігаючи при цьому плавну взаємодію між членами рою. Це вимагає подолання різних обмежень, що накладаються реагуванням у режимі реального часу, адаптивністю до змінних умов навколишнього середовища та уникненням зіткнень. Ройова робототехніка — це нова галузь розподіленої робототехніки, яка черпає натхнення з косяків риб та зграй птахів або інших колоній соціальних комах. Децентралізація управління в ройовій робототехніці забезпечує дві важливі характеристики: стійкість та масштабованість. Це також створює нові виклики, особливо з боку планування шляху, оскільки адаптивність рою до онлайн-змін умов повинна бути збалансована з прагненням до оптимальності. Це складно, і ефективне планування шляху рою потребує інтеграції кількох технологій та алгоритмів.

Впровадження ієрархічних кластерних підходів є потенційним підходом до планування шляхів у ройовій робототехніці. Ці стратегії інтегрують багатоагентні системи (MAS) з оптимізацією колонії мурах (ACO) для використання переваг гібридних алгоритмів. Оптимізація колонії мурах, натхненна харчовою поведінкою мурах, визначає оптимальні шляхи в складних середовищах, тоді як багатоагентні системи забезпечують комунікацію та координацію між безпілотними літальними апаратами. Ієрархічний підхід передбачає управління кожним кластером лідером БПЛА, хоча цей підхід розділяє рій на кластери. У цьому сценарії ACO використовується лідером БПЛА для пошуку оптимального шляху з урахуванням локальних шляхів його кластера. Хоча MAS забезпечує комунікацію між кластерами, сама працює на вищому рівні для підтримки ефективності та координації щодо колективної діяльності рою. Такий гібридний підхід підходить для масштабної ройової діяльності, оскільки він підтримує масштабованість та додатково розширює можливості процедури планування шляху.

Інші, більш складні інструменти, що застосовуються в плануванні шляху

рою, включають впровадження систем соціального навчання для кількох колоній. Завдяки самоорганізації та динамічному вибору лідерів у рої, така тактика дає додаткову здатність адаптуватися до змін умов навколишнього середовища. За цією схемою рій поділяється на кілька колоній, якими керує інший лідер. Ці лідери не обираються заздалегідь. Натомість вони динамічно обираються відповідно до критеріїв ефективності: залишкова енергія, виконані завдання та відстань до перешкод. Соціальне навчання є одним з найважливіших методів, оскільки воно дозволяє БПЛА ділитися всіма своїми знаннями та досвідом один з одним і загалом покращувати свої рішення пізніше. Наприклад, якщо один з лідерів колонії знаходить оптимальний шлях, то цей пошук приносить користь усьому рою, оскільки інші колонії навчаються на ньому. Тому, якщо цей підхід застосовується, то, безумовно, у разі виникнення будь-яких нових перешкод або перешкод рій швидко на них відреагує. Таким чином, процес планування шляху буде ефективнішим.

Це складне, але важливе завдання: оптимізація маршруту польоту БПЛА вимагає передових алгоритмів та організованої структури. Тому це описує одне з найважливіших завдань у цій галузі. Кластерні ієрархічні та багатокolonійні методи соціального навчання дозволяють дослідникам та інженерам розробляти довговічні та успішні ройові системи. Вони добре працюють у нестабільних або динамічних ситуаціях. Якщо ці технології продовжуватимуть удосконалюватися, майбутнє ройових роботів потенційно буде дуже яскравим, особливо в завданнях, що вимагають масштабної та скоординованої діяльності у складних умовах.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНУВАННЯ ШЛЯХУ ДЛЯ РОЇВ

3.1. Оптимізація колонії мурах за принципом максимально-мінімального

Звичайно, методи оптимізації дуже важливі при плануванні траєкторій БПЛА. У цьому випадку витрати енергії мінімізуються, ймовірність успіху місії зростає, і це дозволяє БПЛА долати складні та динамічні середовища. Протягом останніх років безпілотні літальні апарати або БПЛА знайшли широкий спектр застосування, починаючи від військових операцій до сільськогосподарських, надзвичайних та екологічних застосувань. У всіх сферах застосування все ще потрібні підвищені льотні характеристики, що вимагає ефективного та результативного алгоритму планування траєкторії. Планування траєкторії передбачає встановлення найефективнішого маршруту, який БПЛА пройде від заданої початкової точки до пункту призначення, з урахуванням кількох факторів, таких як перешкоди, топографія, споживання енергії та час польоту.

Отже, найскладнішим завданням у місії БПЛА є оптимальний компроміс, якого слід досягти між критеріями точності, витрат часу та використання ресурсів. У місіях з кількома БПЛА одним з ключових аспектів співпраці є планування маршруту, оскільки уникнення зіткнень, ефективне використання ресурсів та успішне виконання місії можуть вимагати точної координації між БПЛА. Це дуже важливо, оскільки методології оптимізації враховують як експлуатаційні обмеження, так і умови навколишнього середовища в реальному часі. З іншого боку, зі зростанням складності діяльності БПЛА зростає потреба в надійних підходах до оптимізації, які гарантують безпечну навігацію та уникнення зіткнень, особливо під час ройових операцій БПЛА.

Покращений варіант: оптимізація колонії мурах за максимальним і мінімальним навантаженням (ММАСО) – це варіант звичайного алгоритму АСО, який був розроблений для вирішення таких проблем, як повільна конвергенція та схильність потрапляти в пастку локальних оптимумів. Мурахи позначають

феромони під час пошуку їжі, щоб окреслити оптимальні шляхи до джерела їжі. Це спільне спостереження є основою моделі АСО. Ці відкладення феромонів збільшуються з кожною мурахою, яка перетинає дорогу, тим самим збільшуючи ймовірність того, що майбутні мурахи зрештою використовуватимуть цей шлях. Процес застоюватиметься через вищу концентрацію феромонів, через що мурахи можуть занадто багато інвестувати в дослідження неоптимальних шляхів. ММАСО розширює це, встановлюючи верхні та нижні межі для феромону, запобігаючи тому, щоб будь-який один шлях став занадто домінуючим. Це відкриває шлях для дослідження інших шляхів, а не до передчасної конвергенції для алгоритму та пошуку кращих рішень. У цьому відношенні ММАСО забезпечує прийняття рішень у режимі реального часу та адаптацію до навколишнього середовища для проблем планування шляху БПЛА. Це встановлює баланс у дослідженні нових шляхів та використанні раніше ефективних маршрутів шляхом регулювання рівнів феромонів, тоді як ММАСО досягає прискореної конвергенції та підвищує надійність рішень.

Внесок ММАСО є значним у швидкість конвергенції та дозволяє БПЛА сходитися на набагато вищих швидкостях у разі зміни навколишніх умов. Це стає досить корисним у тих сценаріях, коли БПЛА повинні уникати перешкод та незвіданих просторів у режимі реального часу, наприклад, під час промислових інспекцій або будь-яких пошуково-рятувальних місій. Це кращий метод планування маршруту БПЛА, оскільки ММАСО продемонстрував постійне прискорення конвергенції з вищою точністю траєкторій порівняно з іншими методами оптимізації, такими як PSO або GA. Саме завдяки цій можливості швидкої конвергенції та оптимізації енергії ММАСО набагато більше підходить для планування траєкторій БПЛА в динамічних та критичних за часом середовищах. Навпаки, GA менш бажані для операцій БПЛА в режимі реального часу, оскільки вони неминуче призводять до повільної конвергенції та високих витрат на обробку, незважаючи на їхню ефективність у вирішенні складних проблем. Аналогічно, PSO часто не має енергоефективності та адаптивності, незважаючи на його зручність використання в певних сценаріях.

3.2 Гібридні моделі оптимізації

Гібридні моделі оптимізації поєднують оптимальні характеристики різних підходів у пошуку кращих рішень складних проблем. Гібридна модель включає мутацію Коші, диференціальну еволюцію (DE) та ММАСО. Цей гібридний метод поєднує можливості швидкого локального пошуку ММАСО з сильним потенціалом глобального пошуку DE та мутацією Коші, що підвищує різноманітність, щоб уникнути ранньої збіжності алгоритму до неоптимальних рішень. Диференціальна еволюція (DE) являє собою еволюційний алгоритм, що використовує механізми кросовера, мутації та відбору на популяції кандидатів на рішення. Вона відома своєю ефективністю при роботі з великими мультимодальними просторами пошуку. Стверджується, що DE покращує гібридну модель ММАСО-DE в глобальному пошуку для цього алгоритму для сканування та дослідження ширшого діапазону потенційних рішень. Одночасно ММАСО зосереджується на локальній оптимізації шляхів, використовуючи процес пошуку, керованого феромонами, для пришвидшення збіжності до ефективної маршрутизації. Мутація Коші вносить більше випадковості в гібрид, покращуючи його. Це допомагає алгоритму не потрапити в пастку локальних оптимумів та постійно шукати кращі глобальні рішення.

Дійсно, ця гібридна модель виявилася досить ефективною в оптимізації та адаптації в режимі реального часу в завданнях планування траєкторії БПЛА. Швидка адаптація та підтримка ефективних траєкторій польоту без зіткнень можливі завдяки гібридному методу ММАСО-DE-Couchy, коли безпілотні літальні апарати проходять крізь уламки та перешкоди, що змінюються в часі, під час реагування на надзвичайні ситуації. Він особливо ефективний у завданнях ройової навігації, які вимагають від групи БПЛА спільної роботи та зміни траєкторій польоту на основі змін в їхньому оточенні. Три основні складові – ММАСО, DE та мутація Коші – інтегровані в цю гібридну модель, отже, це всеохоплюючий метод для покращення операцій БПЛА в складних умовах. На рис. 16 показано приблизне представлення запропонованої гібридної моделі оптимізації за допомогою блок-схеми. Блок-схема представляє сценарій, у якому гібридна модель оптимізації

враховує переслідування дронами: дрони-слідувачі залежать від глибоких нейронних мереж у поєднанні з Proximal Policy Optimization для відстеження визначеної цілі, яка називається відстежуваним дроном. Він збирає інформацію про відстань та місцезнаходження дрона, який відстежує, серед іншої важливої інформації. Дані мають бути включені до розподіленої системи, відповідальної за координацію між дронами-слідувачами. Ця інформація обробляється глибокою нейронною мережею за допомогою шарів, після чого вона вирівнюється, коригуються ваги, а функція SoftMax застосовується для прогнозування найбільш доцільних дій. Завдяки постійному навчанню з навколишнього середовища та використанню винагород, алгоритм PPO може коригувати політику дій, оптимізуючи рухи дрона та покращуючи його загальну продуктивність. Завдяки використанню гібридної методики, яка поєднує традиційну оптимізацію траєкторії з навчанням з підкріпленням, поведінка дронів може бути адаптивно покращена в режимі реального часу. Такий підхід гарантує ефективне планування траєкторії, контроль формування та ефективне відстеження цілей у динамічному та розподіленому середовищі.

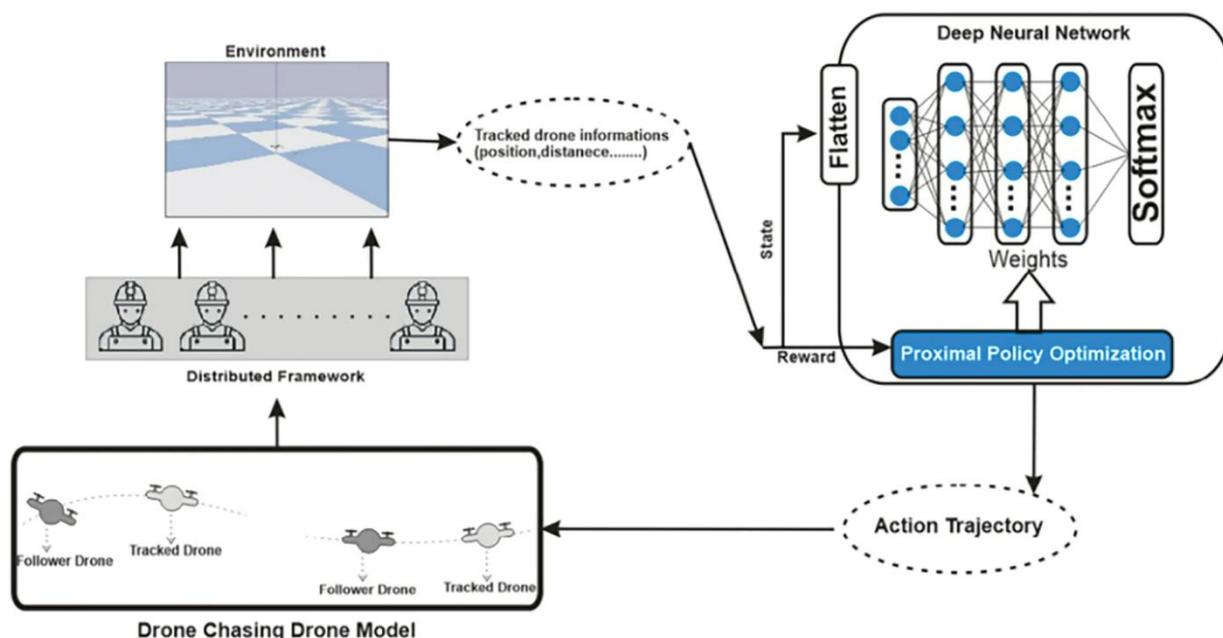


Рис.3.1 Архітектура гібридної моделі оптимізації

Більше того, три колонії БПЛА орієнтуються в динамічному середовищі в рамках інтегрованої системи планування шляху для роїв БПЛА, зображеної на рис.

11, яка використовує ієрархічну кластеризацію та багатоколоніальні системи. Методика складається з двох етапів: спочатку алгоритм оптимізації колонії мурах Max-Min (ММАСО) визначає оптимальний шлях для лідера кожної колонії. На другому етапі моделі агрегації Вікссека (MAS) решта БПЛА дотримуються своїх лідерів. Колонії об'єднуються, щоб діяти як згуртована мережа, наближаючись до своєї мети. Вони стикаються з труднощами, пов'язаними з такими явищами, як торнадо та гірські вершини, які вимагають точної координації для запобігання зіткненням. Для ефективного навігації в цьому мінливому середовищі всі БПЛА повинні досягти синхронізації. Вищезгаданий сценарій лаконічно підсумовує концепції, розглянуті у відповідних розділах, підкреслюючи три основні теми: планування шляху, застосування кластерних ієрархічних методологій та включення принципів соціального навчання, отриманих з багатоколоніальних систем.

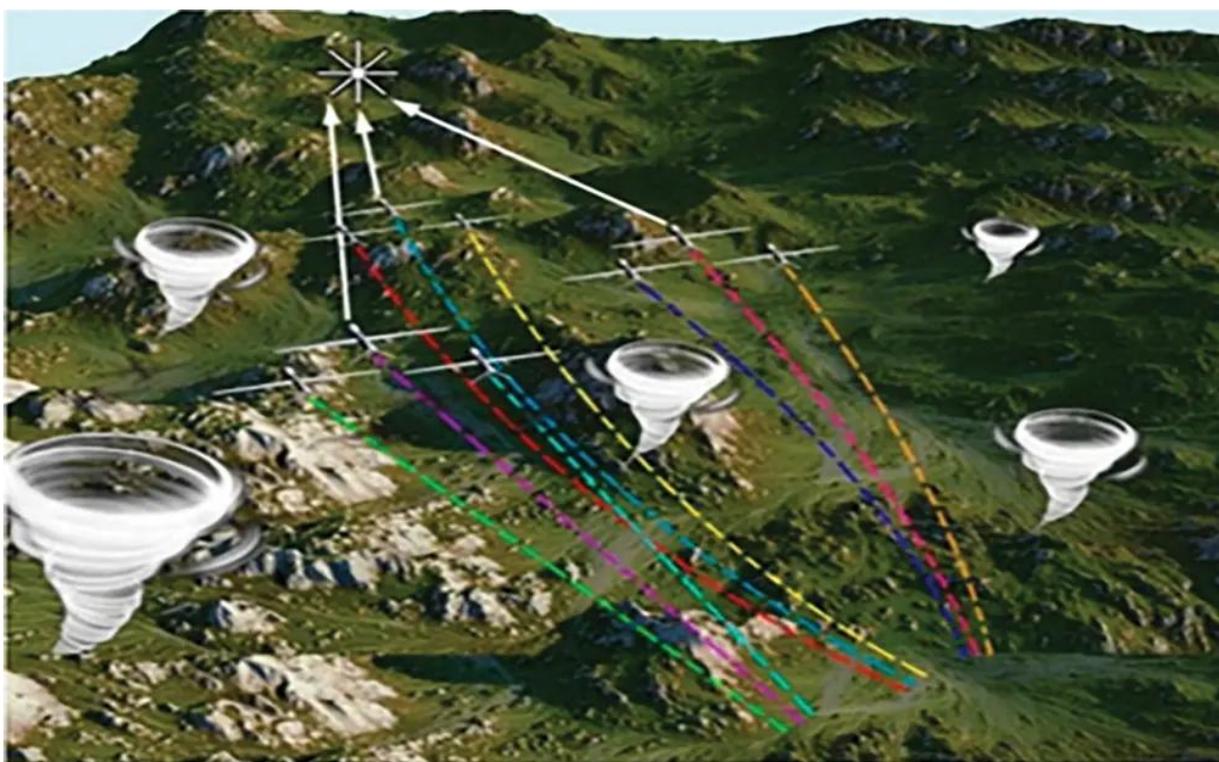


Рис.3.2 Скоординоване планування шляху для роїв БПЛА: ієрархічна кластеризація та багатоколонійні підходи

3.3. Сенсорні платформи для БПЛА

Системи датчиків є важливими для забезпечення точного відстеження цілей та уникнення перешкод у застосуваннях БПЛА. Конструкції цих платформ

інтегрують кілька сенсорних технологій, включаючи GPS-модулі, LiDAR, ультразвукові датчики та інфрачервоні камери. Кожен тип датчика має певні переваги та має певні показники. LiDAR пропонує точні вимірювання відстані, що робить його ідеальним для виявлення перешкод на шляху БПЛА; навпаки, інфрачервоні камери чудово розпізнають об'єкти, що випромінюють тепло, що особливо вигідно для пошуково-рятувальних місій. Ультразвукові датчики забезпечують економічно ефективне рішення для ідентифікації перешкод на близькій відстані, тоді як системи GPS пропонують точну інформацію про положення, що є критично важливим для навігації як у неструктурованому, так і в організованому середовищі. Інтеграція даних з кількох датчиків є важливою для комплексного проектування сенсорної платформи. Об'єднання даних датчиків поєднує інформацію з безлічі джерел для підвищення ситуаційної обізнаності, що має вирішальне значення для прийняття обґрунтованих рішень щодо планування шляху та уникнення зіткнень. Такі обмеження усуваються, коли інтегруються різноманітні дані з різних датчиків, такі як продуктивність LiDAR за несприятливих погодних умов або труднощі, з якими стикаються інфрачервоні датчики під час виявлення нетеплових перешкод. Передові алгоритми об'єднання даних, багато з яких включають методи машинного навчання, дозволяють покращити загальну продуктивність навігації БПЛА. Завдяки таким алгоритмам БПЛА може обробляти величезні обсяги даних датчиків і сприймати ймовірні ризики з набагато більшою точністю.

Конструкція також повинна враховувати обмеження корисного навантаження та енергії БПЛА. Легкі та енергоефективні датчики є кращими для підвищення тривалості польоту. Впровадження алгоритмів управління енергією, які можуть динамічно розподіляти потужність між різними системами БПЛА, ще більше підвищує експлуатаційну ефективність. Конструкція сенсорної платформи БПЛА повинна враховувати аспекти споживання енергії та продуктивності датчика, що безпосередньо пов'язані з надійністю та тривалістю місії. Архітектура Конструкція буде модульною; це полегшить масштабованість та адаптивність. Ця модульна архітектура дозволяє налаштування для низки застосувань, включаючи міську навігацію, де типові середовища з перешкодами мають високу щільність, і

тому очікуються різні комбінації датчиків порівняно з операціями на відкритому полі. Ключовим фактором є можливість обробки в режимі реального часу, що забезпечує швидке реагування та пом'якшення наслідків БПЛА у разі будь-яких змін у середовищі.

Таким чином, моделювання SIL передбачає відтворення реальних умов та дозволяє проводити контрольовані експерименти. З цієї причини SIL широко використовується для валідації сенсорних платформ. Моделювання SIL є безпечним та недорогим способом оцінки уникнення перешкод та відстеження цілей перед розгортанням апаратного БПЛА. Ці симуляції перевіряють надійність сенсорної платформи та ефективність алгоритмів шляхом взаємодії з різними динамічними сценаріями, такими як збурення вітру, рухомі перешкоди та складні рельєфи місцевості. Гібридні сенсорні методи демонструють чудову валідацію продуктивності за допомогою моделювання SIL. Наприклад, LiDAR у поєднанні з інфрачервоними камерами надає можливість фіксувати сильні сторони датчиків для підвищення точності виявлення та зменшення кількості хибнопозитивних результатів. Інфрачервоне доповнення даних LiDAR значно покращує інформацію порівняно з лише LiDAR та значно покращує загальну ситуаційну обізнаність. Ці результати моделювання зазвичай включають ключові показники, такі як рівень успішності уникнення перешкод, споживання енергії, час реакції та точність виявлення, серед інших, які можуть вважатися необхідними для тестування продуктивності будь-якої конфігурації датчиків. Алгоритми датчиків можна ітеративно тестувати та вдосконалювати для підвищення надійності в реальних застосуваннях у середовищах SIL. Такий зворотний зв'язок моделювання може бути використаний для подальшої оптимізації БПЛА для різних операційних сценаріїв, що включає налаштування його параметрів, таких як поріг виявлення та чутливість датчиків. Таким чином, ці симуляції дозволяють оцінити різні стратегії навігації та способи, за допомогою яких різні конфігурації датчиків та методи обробки даних можуть дозволити БПЛА адаптуватися до динамічних умов навколишнього середовища.

Враховуючи тематичні дослідження поточної експлуатації БПЛА для точного землеробства, моніторингу навколишнього середовища та пошуково-

рятувальних застосувань, оцінка продуктивності сенсорної платформи є незамінною. Гібридна сенсорна платформа, що включає LiDAR та інфрачервоні камери, була розроблена та протестована за допомогою програмного забезпечення в циклі (SIL) для вирішення таких проблем, як точна ідентифікація перешкод, ефективне відстеження цілі та оптимізація енергії. Ці сценарії включали реальне моделювання складних міських та лісових ландшафтів з динамічними перешкодами, такими як рухомі транспортні засоби, пішоходи та інші умови навколишнього середовища, такі як вітер та дощ. Технологія гібридних датчиків, заснована на методі об'єднання даних, яка поєднуватиме 3D-картографування високої роздільної здатності за допомогою LiDAR з можливостями інфрачервоного виявлення в умовах низької освітленості, була протестована за різними параметрами, такими як уникнення перешкод, точність відстеження цілі, час відгуку та споживання енергії. Рівень успішності моделювання SIL з SIL становив 92% в уникненні перешкод у міських умовах та 85% у густо заліснених районах, де LiDAR мав труднощі, але інфрачервоні дані компенсували це. Успіх у відстеженні цілі досяг 98% в умовах низької освітленості завдяки кращій продуктивності, що забезпечується інфрачервоним випромінюванням. Споживання енергії збільшилося на 15% через потреби обробки об'єднання даних, але це компенсує скорочення часу виконання місії на 20%. Ітеративне тестування в середовищі SIL дозволило вдосконалити алгоритми датчиків, що зменшило кількість хибнопозитивних результатів на 25%, одночасно підвищуючи стійкість всієї системи. Моделювання надало важливе розуміння того, як найкраще оптимізувати гібридну сенсорну платформу перед реальним розгортанням, і показало значне підвищення продуктивності, особливо в складних умовах. Цей випадок підкреслює необхідність поєднання додаткових сенсорних технологій з проведенням моделювання SIL для підвищення продуктивності БПЛА шляхом ітеративного тестування та вдосконалення.

3.4 Порівняльний аналіз навігаційних стратегій

Серед найважливіших питань навігації БПЛА оптимальний спосіб проектування траєкторії є важливим питанням для забезпечення економічної

ефективності та ефективності операцій. Складність та безліч місій, що включають пошук, рятування, спостереження та картографування, вимагають вибору відповідного навігаційного підходу для забезпечення оптимізації продуктивності. Складність місцевості, цілі місії, часові обмеження та споживання енергії стають критичними факторами при визначенні найефективнішого шляху. Хоча існують інші методи планування траєкторії, дві з найбільш використовуваних та оцінених стратегій стосуються підходів найшвидшого шляху та найближчого сусіда для різних типів місій БПЛА. Кожна з цих стратегій має свої переваги та проблеми залежно від типу місії, умов навколишнього середовища та пріоритетів операцій. У процесі планування навігації БПЛА значну увагу слід приділяти порівняльному аналізу цих двох методів з точки зору їх відносних переваг та недоліків.

Вибір відповідного методу проекції шляху є ключовим для забезпечення економічної та часової ефективності планування навігації БПЛА. Було розглянуто дві основні стратегії: «Найшвидший шлях» та «Найближчий сусід». Стратегія найшвидшого шляху спрямована на мінімізацію часу подорожі шляхом вибору маршруту з максимальною середньою швидкістю та невеликою кількістю перешкод. Вона буде корисною головним чином у критичних для часу застосуваннях, де потрібні часові реакції для таких цілей, як служби екстреної допомоги та військові служби. Загальна мета полягає в тому, щоб спробувати уникнути затримок, що виникають через перешкоди, шляхом вибору варіантів маршруту, щоб оптимізувати швидкість, навіть якщо загальна довжина подорожі має бути довшою. Однак це передбачає глибоке знання навколишнього середовища та адаптивне налаштування з урахуванням нових викликів. Стратегія «Найближчий сусід» прагне мінімізувати пряму відстань до наступної точки маршруту. Цю стратегію легше реалізувати, оскільки БПЛА летить до найближчої відкритої локації, доки не досягне всіх цілей. Цей метод особливо підходить для завдань картографування або інспекції, де ключовою метою є покриття всього регіону з максимально можливою ефективністю.

У сфері безпілотних літальних апаратів сенсорні системи є основою, необхідною для виконання двох основних завдань: відстеження цілей з високою точністю та уникнення перешкод. Більшість розроблених платформ для БПЛА

інтегрують кілька сенсорних технологій, включаючи GPS-модулі, LiDAR, ультразвукові датчики та інфрачервоні камери. Кожен із типів датчиків має свої специфічні переваги. LiDAR забезпечує точні вимірювання відстані; тому він є ідеальним вибором для виявлення перешкод на шляху БПЛА. З іншого боку, інфрачервоні камери дуже добре виявляють об'єкти, які випромінюють тепло, що стає досить корисним у застосуваннях, пов'язаних з пошуком та порятунком. У ситуаціях, коли вартість має бути низькою, ультразвукові датчики є гарною альтернативою для виявлення в межах малого радіуса, тоді як системи GPS надають дані про місцезнаходження, необхідні для навігації з точністю як у неструктурованих, так і в структурованих середовищах. Оскільки використовується багато датчиків, інтеграція даних має велике значення при розробці інтегрованої сенсорної платформи. Здатність інтегрувати дані, що надаються всіма такими датчиками, називається ситуаційною обізнаністю. Це критично важливо для прийняття обґрунтованих рішень щодо планування шляху та уникнення зіткнень. Інтеграція даних повинна суттєво підвищити рівень загальної продуктивності, пом'якшуючи обмежувальний ефект, що виникає при використанні окремих датчиків, таких як несприятливі погодні умови, які повністю знижують продуктивність LiDAR та роблять інфрачервоні датчики нездатними виявляти нетеплові бар'єри. Розробляються вдосконалені алгоритми об'єднання даних, багато з яких базуються на алгоритмах машинного навчання. Вони покращують навігаційні можливості БПЛА, обробляючи величезні обсяги даних датчиків для точнішого виявлення загроз. Загалом, проектування сенсорних систем для БПЛА зумовлене обмеженнями корисного навантаження та енергії. Трохи легші та енергоефективніші датчики потрібні для збільшення часу польоту, тоді як інтеграція алгоритмів управління енергією дозволить динамічно розподіляти потужність у різних підсистемах БПЛА, тим самим значно підвищуючи загальну ефективність. Модульна архітектура сенсорної платформи дозволяє налаштовувати її для задоволення багатьох різних потреб застосувань. Наприклад, вимоги до датчиків автономного польоту в містах суттєво відрізняються від сценаріїв на відкритому полі через часто складні конфігурації перешкод і вимагають специфічних комбінацій датчиків або зовсім іншого набору датчиків.

Можливості обробки в режимі реального часу дозволяють БПЛА швидко реагувати на зміни в навколишньому середовищі, тим самим зменшуючи ймовірність зіткнень. Програмне моделювання в циклі (Software-in-the-loop) отримало широке поширення в тестуванні сенсорних платформ, оскільки воно здатне відносно добре імітувати реальність, а також дозволяє проводити контрольовані експерименти. Це безпечні та недорогі способи перевірки можливостей БПЛА щодо уникнення перешкод та відстеження цілей без необхідності створювати апаратне забезпечення. Вони досягають цього, забезпечуючи перевірку надійності сенсорної платформи та ефективності алгоритмів у багатьох динамічних сценаріях, включаючи збурення вітру та рухомі перекриття. Застосування гібридних сенсорних підходів значно підвищило перевірку продуктивності цих симуляцій. Поєднуючи LiDAR з інфрачервоними камерами, вони повністю використовують додаткові сильні сторони, які ці датчики впроваджують, тим самим дозволяючи підвищити точність виявлення, зменшуючи кількість хибнопозитивних результатів. Інфрачервона інформація збагачує дані LiDAR і, отже, підвищує ситуаційну обізнаність. Що стосується статистики, пов'язаної з продуктивністю, то коефіцієнт успішного уникнення перешкод, споживання енергії, час реакції та точність виявлення – усі ці параметри залишаються важливими для встановлення відносної ефективності різних налаштувань датчиків під час моделювання SIL. Ці налаштування дозволяють проводити ітеративне тестування та вдосконалення алгоритмів датчиків, підвищуючи надійність їх практичного застосування. Такі параметри, як пороги виявлення та чутливість датчиків, можна оптимізувати на БПЛА для широкого діапазону робочих умов на основі вхідних даних імітаційних моделей. Моделювання дозволяє оцінити кілька навігаційних стратегій та підкреслити, як різні конфігурації датчиків та методи обробки даних впливають на здатність БПЛА адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища.

Тематичні дослідження поточних експлуатаційних БПЛА підтверджують необхідність оцінки продуктивності сенсорної платформи в застосуваннях, пов'язаних з точним землеробством, моніторингом навколишнього середовища та пошуково-рятувальними операціями. Було розроблено та протестовано гібридну

сенсорну архітектуру LiDAR у поєднанні з інфрачервоними камерами за допомогою симуляцій SIL для вирішення проблем виявлення перешкод, ефективного відстеження цілей та оптимізації енергії. Ці симуляції проводилися в природному середовищі, імітуючи міські, лісові та складні місцевості з рухомими перешкодами, такими як інші транспортні засоби, вітер та дощ. Гібридна система була впроваджена та оцінена для методів об'єднання даних на основі таких характеристик, як уникнення перешкод, точність відстеження цілей, час реакції та споживання енергії. Коли обмеження LiDAR пом'якшуються за допомогою інфрачервоних даних, симуляції SIL показали 92% успіху в уникненні перешкод у місті та 85% успіху в густолісистих районах. Це було додатково підкріплено вражаючим рівнем успіху 98% у відстеженні цілей в умовах поганого освітлення завдяки збагаченим можливостям інфрачервоного випромінювання. Незважаючи на те, що ці збагачені методи призвели до споживання на 15% більше енергії завдяки збільшенню обробки об'єднання даних, це було добре компенсовано скороченням часу виконання місії на 20%. Алгоритми датчиків були додатково вдосконалені шляхом ітеративного тестування в середовищі SIL: -25% зниження кількості хибнопозитивних результатів; це підвищує загальну стійкість системи. Це тематичне дослідження обґрунтовує включення датчиків з додатковими технологіями та застосування SIL-моделювання для постійного тестування та оптимізації з метою покращення продуктивності БПЛА.

Правильний вибір методу прогнозування шляху є надзвичайно важливим для БПЛА, оскільки це значною мірою впливає на операційну ефективність та економічну ефективність. Серед кількох стратегій навігації необхідно вибрати найкращу продуктивність, враховуючи широкий спектр завдань БПЛА, що здійснюють пошуково-рятувальні роботи, спостереження та екологічне картографування. Складність місцевості, цілі місії, часові обмеження та споживання енергії – це лише деякі аспекти, які необхідно враховувати під час вибору найефективнішого маршруту. З численних методологій планування шляху дві найважливіші включають стратегії «Найшвидший шлях» та «Найближчий сусід»; кожна з них має окремі переваги та проблеми, що залежать від типу місії, умов навколишнього середовища та операційних пріоритетів. «Найшвидший

шлях» намагається заощадити час подорожі, вибираючи шлях з максимальною середньою швидкістю та мінімальними перешкодами; це буде найбільш корисно для операцій, де кожна секунда на рахунку, таких як служби екстреної допомоги та військові операції. Це передбачає більшу увагу до швидкості, а не до відстані; це вимагає глибокого розуміння місцевості та гнучкості в адаптації до подолання неочікуваних перешкод. На противагу цьому, метод «Найближчий сусід» безпосередньо оптимізує мінімальну відстань до наступної точки маршруту; Його реалізація проста, оскільки, починаючи з будь-якої випадково обраної точки, БПЛА рухається до найближчої невідвіданої точки, доки не будуть досягнуті всі цілі. Це ефективний підхід у застосуваннях, пов'язаних з картографуванням або інспекцією, де зазвичай головною метою є охоплення території. Однак отриманий маршрут може бути неефективним, з повторюваними поворотами або навіть поверненням назад, що, ймовірно, збільшує час, необхідний для подорожі між точками.

Порівняльний аналіз двох навігаційних систем, висвітлює їхні показники продуктивності, включаючи часову та економічну ефективність, складність та відповідне застосування. Алгоритм «Найшвидший шлях» перевершує інших з точки зору часової ефективності, але може призвести до значних накладних витрат через свою складність. Алгоритм «Найближчий сусід» забезпечує значну економію коштів при низькій складності та тому добре підходить для таких застосувань, як огляд місцевості та картографування, серед іншого. Розуміння переваг та недоліків різних навігаційних систем дозволить операторам БПЛА вибрати найбільш підходящий підхід, враховуючи конкретні вимоги та умови місії.

ВИСНОВКИ

Це дослідження пропонує ретельний аналіз критичної ролі сенсорних систем у покращенні продуктивності та адаптивності безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різних сферах застосування, таких як точне землеробство, моніторинг навколишнього середовища та пошуково-рятувальні місії. Дослідження підкреслює комбіновані переваги різних сенсорних технологій, включаючи LiDAR, інфрачервоні камери, ультразвукові датчики та GPS-модулі, у сприянні складному відстеженню цілей та уникненню перешкод. Здатність гібридних сенсорних платформ долати притаманні окремим датчикам обмеження, включаючи нездатність інфрачервоних камер виявляти об'єкти, що не випромінюють тепло, та знижену продуктивність LiDAR за несприятливих погодних умов, є критичним відкриттям. В огляді підкреслюється важливість інтеграції сенсорних технологій з передовими методами об'єднання даних, особливо тими, що використовують машинне навчання, для підвищення ситуаційної обізнаності та операційної ефективності. Критична роль ітеративного тестування та вдосконалення алгоритмів у подоланні розриву між теоретичними можливостями та реальною продуктивністю додатково ілюструється моделюванням Software-in-the-Loop.

Порівняльний аналіз навігаційних стратегій, таких як підходи «Найшвидший шлях» та «Найближчий сусід», надає практичні поради для оптимізації планування маршруту з урахуванням різних екологічних обмежень та вимог місії. Ці результати підкреслюють постійну необхідність інновацій у методах обробки даних та сенсорних технологіях для покращення функціональності БПЛА. Ця робота є важливою як для науковців, так і для практиків, оскільки вона забезпечує фундаментальне посилення для майбутніх досліджень та практичного впровадження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Robert O. Work, Shawn Brimley. 20YY Preparing for War in the Robotic Age. https://s3.us-east-1.amazonaws.com/files.cnas.org/hero/documents/CNAS_20YY_WorkBrimley.pdf
2. Güray SONUGÜR. A Review of quadrotor UAV: Control and SLAM methodologies ranging from conventional to innovative approaches. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921889022002317>
3. Yunes Sh. ALQUDSI, Ayman H. KASSEM, Gamal M. El-BAYOUMI. A Robust Hybrid Control for Autonomous Flying Robots in an Uncertain and Disturbed Environment. https://bulletin.incas.ro/files/alqudsi_kassem_el-bayoumi__vol_13_iss_2.pdf
4. Syed Agha Hassnain Mohsan, Nawaf Qasem Hamood Othman, Yanlong Li1, Mohammed H. Alsharif, Muhammad Asghar Khan. Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. https://www.researchgate.net/publication/366548023_Unmanned_aerial_vehicles_UAV_s_practical_aspects_applications_open_challenges_security_issues_and_future_trends
5. Yunes ALQUDSI. Advanced Control Techniques for High Maneuverability Trajectory Tracking in Autonomous Aerial Robots. https://www.researchgate.net/publication/386900082_Advanced_Control_Techniques_for_High_Maneuverability_Trajectory_Tracking_in_Autonomous_Aerial_Robots
6. Mohamed Abdelkader, Samet Güler, Hassan Jaleel, Jeff S. Shamma. Aerial Swarms: Recent Applications and Challenges. https://www.researchgate.net/publication/353377933_Aerial_Swarms_Recent_Applications_and_Challenges
7. Kevin M. Lynch and Frank C. Park. MODERN ROBOTICS. <https://hades.mech.northwestern.edu/images/7/7f/MR.pdf>

8. Chen X, He S, Zhang Y, Tong LC, Shang P, Zhou X (2020) Yard crane and agv scheduling in automated container terminal: A multi-robot task allocation framework. https://www.researchgate.net/publication/339527199_Yard_crane_and_AGV_scheduling_in_automated_container_terminal_A_multi-robot_task_allocation_framework

9. Ashush N, Greenberg S, Manor E, Ben-Shimol Y (2023) Unsupervised drones swarm characterization using rf signals analysis and machine learning methods. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/3/1589>

10. Sun Y, Li J, Wang Z, He X, Fu Q, Zou Y (2023) Distributed formation-aggregation control algorithm for a cluster of quadrotors. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016003222008717>

11. Sai S, Garg A, Jhavar K, Chamola V, Sikdar B (2023) A comprehensive survey on artificial intelligence for unmanned aerial vehicles. https://www.researchgate.net/publication/374021900_A_Comprehensive_Survey_on_Artificial_Intelligence_for_Unmanned_Aerial_Vehicles

12. Soori M, Arezoo B, Dastres R (2023) Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. https://www.researchgate.net/publication/369818981_Artificial_Intelligence_Machine_Learning_and_Deep_Learning_in_Advanced_Robotics_A_Review

13. Alqudsi Y (2024) Coordinated formation control for swarm flying robots. In: 2024 1st International Conference on Emerging Technologies for Dependable Internet of Things (ICETI), IEEE, Sana'a, Yemen, pp 1–8. https://www.researchgate.net/publication/386903180_Coordinated_Formation_Control_for_Swarm_Flying_Robots

14. Elin K. Jacob. Classification and Categorization: A Difference that Makes a Difference. https://www.researchgate.net/publication/32956263_Classification_and_Categorization_A_Difference_that_Makes_a_Difference

15. J.M. Dow, R.E. Neilan, C. Rizos. The International GNSS Service (IGS) in a Changing Landscape of Global Navigation Satellite Systems.

https://www.researchgate.net/publication/225572683_The_International_GNSS_Service_in_a_Changing_Landscape_of_Global_Navigation_Satellite_Systems

16. Faraz M. Mirzaei, Stergios I. Roumeliotis. A Kalman Filter-Based Algorithm for IMU-Camera Calibration: Observability Analysis and Performance Evaluation.

<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=1371bd3e6834136d08e917c6e51ca9ff61bbd323>

17. J. HYYPPA, H. HYYPPA, D. LECKIE, F. GOUGEON, M. MALTAMO. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests.

<https://courses.washington.edu/cfr550/pdfs/Hyyppa%20et%20al.%202008.pdf>

18. Y. K. Chan and V. C. Koo. AN INTRODUCTION TO SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR). https://www.jpier.org/ac_api/download.php?id=07110101

19. Xin Luo, Maocai Wang, Guangming Daia, Zhiming Song. Constellation design for earth observation based on the characteristics of the satellite ground track. https://www.researchgate.net/publication/312481271_Constellation_Design_for_Earth_Observation_based_on_the_Characteristics_of_the_Satellite_Ground_Track

20. J. Everaerts. THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAVS) FOR REMOTE SENSING AND MAPPING. https://www.isprs.org/proceedings/xxxvii/congress/1_pdf/203.pdf

21. Sonugur G (2022) A review of quadrotor uav: Control and slam methodologies ranging from conventional to innovative approaches. Robot Auton Syst 161:104342

22. Alqudsi YS, Kassem AH, El-Bayoumi GM (2021) A robust hybrid control for autonomous flying robots in an uncertain and disturbed environment. INCAS B 13(2):187–204

23. Mohsan SAH, Othman NQH, Li Y, Alsharif MH, Khan MA (2023) Unmanned aerial vehicles (uavs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. Intel Serv Robotics 16(1):109–137

24. Alqudsi Y (2024) Advanced control techniques for high maneuverability trajectory tracking in autonomous aerial robots. In: 2024 1st International Conference on Emerging Technologies for Dependable Internet of Things (ICETI), IEEE, Sana'a, Yemen, pp 1–8.
25. Kamel MA, Yu X, Zhang Y (2020) Formation control and coordination of multiple unmanned ground vehicles in normal and faulty situations: A review. *Annu Rev Control* 49:128–144
26. Abdelkader M, Güler S, Jaleel H, Shamma JS (2021) Aerial swarms: Recent applications and challenges. *Curr Robot Rep* 2:309–320
27. Khelifi M, Butun I (2022) Swarm unmanned aerial vehicles (suavs): a comprehensive analysis of localization, recent aspects, and future trends. *J Sensors* 2022:1–10
28. Li Q, Xiong H, Ding Y, Song J, Liu J, Chen Y (2022) A review of unmanned aerial vehicle swarm task assignment. *International Conference on Guidance, Navigation and Control*, pp 6469–6479
29. Alqudsi YS, Saleh RA, Makaraci M, Ertunç HM (2024) Enhancing aerial robots performance through robust hybrid control and metaheuristic optimization of controller parameters. *Neural Comput & Applic* 36(1):413–424
30. Ouyang Q, Wu Z, Cong Y, Wang Z (2023) Formation control of unmanned aerial vehicle swarms: A comprehensive review. *Asian J Control* 25(1):570–593
31. Tosato P, Facinelli D, Prada M, Gemma L, Rossi M, Brunelli D (2019) An autonomous swarm of drones for industrial gas sensing applications. In: 2019 IEEE 20th International Symposium on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks” (WoWMoM), IEEE, pp 1–6
32. Phadke A, Medrano FA (2024) Increasing operational resiliency of uav swarms: An agent-focused search and rescue framework. *Aerosp Res Commun* 1:12420
33. Lehto M, Hutchinson B (2020) Mini-drones swarms and their potential in conflict situations. In: 15th international conference on cyber warfare and security. Peregrine Technical Solutions, Perth, Australia. 12:326–334
34. Adoni, W.Y.H.; Fareedh, J.S.; Lorenz, S.; Gloaguen, R.; Madriz, Y.; Singh, A.; Kühne, T.D. *Intelligent Swarm: Concept, Design and Validation of Self-Organized*

UAVs Based on Leader–Followers Paradigm for Autonomous Mission Planning. *Drones* 2024, 8, 575. <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/10/575>

35. İ. Bekmezci, E. Şentürk, and T. Türker, “Security issues in flying ad-hoc networks (fanets),” *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 13–21, 2016.

36. J.-A. Maxa, M.-S. B. Mahmoud, and N. Larrieu, “Survey on uanet routing protocols and network security challenges,” *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 2017.

37. G. K. Pandey, D. S. Gurjar, H. H. Nguyen, and S. Yadav, “Security threats and mitigation techniques in uav communications: A comprehensive survey,” *IEEE Access*, 2022.

38. A. Chriki, H. Touati, H. Snoussi, and F. Kamoun, “Fanet: Communication, mobility models and security issueszhi2020,” *Computer Networks*, vol. 163, p. 106877, 2019.

39. F. Tlili, L. C. Fourati, S. Ayed, and B. Ouni, “Investigation on vulnerabilities, threats and attacks prohibiting UAVs charging and depleting UAVs batteries: Assessments & countermeasures,” *Ad Hoc Networks*, vol. 129, no. January, 2022.

40. Y. Zhi, Z. Fu, X. Sun, and J. Yu, “Security and privacy issues of uav: A survey,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 95–101, 2020.

41. M. Yahuza, M. Y. I. Idris, I. B. Ahmedy, A. W. A. Wahab, T. Nandy, N. M. Noor, and A. Bala, “Internet of drones security and privacy issues: Taxonomy and open challenges,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57 243–57 270, 2021.

42. V. Hassija, V. Chamola, A. Agrawal, A. Goyal, N. C. Luong, D. Niyato, F. R. Yu, and M. Guizani, “Fast, reliable, and secure drone communication: A comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 4, pp. 2802–2832, 2021.

43. J.-P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman, and A. Chehab, “Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations,” *Internet of Things*, vol. 11, p. 100218, 2020.

44. R. Altawy and A. M. Youssef, “Security, privacy, and safety aspects of civilian drones: A survey,” *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, vol. 1, no. 2,

pp. 1–25, 2016.

45. J. Sharma and P. S. Mehra, “Secure communication in iot-based uav networks: A systematic survey,” *Internet of Things*, p. 100883, 2023.

46. A. Rugo, C. A. Ardagna, and N. E. Ioini, “A security review in the uavnet era: threats, countermeasures, and gap analysis,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 55, no. 1, pp. 1–35, 2022.

47. N. Kumar and A. Chaudhary, “Surveying cybersecurity vulnerabilities and countermeasures for enhancing uav security,” *Computer Networks*, vol. 252, p. 110695, 2024.

48. Y. Mekdad, A. Aris, L. Babun, A. El Fergougui, M. Conti, R. Lazzeretti, and A. S. Uluagac, “A survey on security and privacy issues of uavs,” *Computer Networks*, vol. 224, p. 109626, 2023.

49. H. J. Hadi, Y. Cao, K. U. Nisa, A. M. Jamil, and Q. Ni, “A comprehensive survey on security, privacy issues and emerging defence technologies for uavs,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 213, p. 103607, 2023.

50. Z. Wang, Y. Li, S. Wu, Y. Zhou, L. Yang, Y. Xu, T. Zhang, and Q. Pan, “A survey on cybersecurity attacks and defenses for unmanned aerial systems,” *Journal of Systems Architecture*, vol. 138, p. 102870, 2023.

51. K.-Y. Tsao, T. Girdler, and V. G. Vassilakis, “A survey of cyber security threats and solutions for uav communications and flying ad-hoc networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 133, p. 102894, 2022.

52. H. Hildmann and E. Kovacs, “Review: Using unmanned aerial vehicles (UAVs) as mobile sensing platforms (MSPs) for disaster response, civil security and public safety,” *Drones*, vol. 3, no. 3, 2019, Art. no. 59. doi: 10.3390/drones3030059.

53. Z. A. Ali, A. Israr, E. H. Alkhamash, and M. Hadjouni, “A leader-follower formation control of multi-UAVs via an adaptive hybrid controller,” *Complexity*, vol. 2021, no. 1, 2021, Art. no. 9231636. doi: 10.1155/2021/9231636.

54. M. Hassanalian and A. Abdelkefi, “Classifications, applications, and design challenges of drones: A review,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 91, no. 4, pp. 99–131, 2017. doi: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.

55. H. Xiao, Z. Li, and C. L. Philip Chen, “Formation control of leader-follower

mobile robots' systems using model predictive control based on neural-dynamic optimization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 9, pp. 5752–5762, 2016. doi: 10.1109/TIE.2016.2542788.

56. G. Dhiman and A. Kaur, "A hybrid algorithm based on particle swarm and spotted hyena optimizer for global optimization," in *Soft Computing for Problem Solving*. Singapore: Springer International Publishing, 2019, pp. 599–615.

57. J. Luan, Z. Yao, F. Zhao, and X. Song, "A novel method to solve supplier selection problem: Hybrid algorithm of genetic algorithm and ant colony optimization," *Math. Comput. Simul.*, vol. 156, no. 4, pp. 294–309, 2019. doi: 10.1016/j.matcom.2018.08.011.

58. T. Stützle and H. H. Hoos, "Max-Min ant system," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 16, pp. 889–914, 2000.

59. H. M. Omar, "Hardware-in-the-loop simulation of time-delayed anti-swing controller for quadrotor with suspended load," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, 2022, Art. no. 1706. doi: 10.3390/app12031706.

60. K. D. Nguyen and C. Ha, "Development of hardware-in-the-loop simulation based on gazebo and pixhawk for unmanned aerial vehicles," *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 238–249, 2018. doi: 10.1007/s42405-018-0012-8.

61. K. D. Nguyen and T. -T. Nguyen, "Vision-based software-in-the-loop-simulation for unmanned aerial vehicles using gazebo and PX4 open source," in *2019 Int. Conf. Syst. Sci. Eng. (ICSSE)*, IEEE, 2019, pp. 429–432.

62. A. Altan and R. Hacıoğlu, "Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on UAV for real-time target tracking under external disturbances," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 138, no. 1, 2020, Art. no. 106548. doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106548.

63. A. M. Isaev, A. S. Adamchuk, S. R. Amirokov, M. A. Isaev, and M. A. Grazhdankin, "Mathematical modelling of the stabilization system for a mobile base video camera using quaternions," in Marco S, Massimo M, Drozdova VI, Kalmykov IA, Eds., *Proc. REMS 2018—Russian Fed. Eur. Multidiscip. Symp. Comput. Sci. ICT, Stavropol—Dombay, Russia*, 2018. pp. 51–62.

64. M. H. Ahmad, K. Osman, M. F. M. Zakeri, and S. I. Samsudin,

“Mathematical modelling and PID controller design for two DOF gimbal system,” in 2021 IEEE 17th Int. Colloq. Signal Process. Appl. (CSPA), IEEE, 2021, pp. 138–143.

65. D. Lancovs, “Broadcast transponders for low flying unmanned aerial vehicles,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 24, no. 4, pp. 370–376, 2017. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.098.

66. H. Shakhathreh et al., “Unmanned aerial vehicles (UAVs) survey on civil applications and key research challenges,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 48572–48634, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.

67. P. Sánchez, R. Casado, and A. Bermúdez, “Real-time collision-free navigation of multiple UAVs based on bounding boxes,” *Electronics*, vol. 9, no. 10, 2020, Art. no. 1632.

68. A. Tullu, M. Hassanalian, and H. -Y. Hwang, “Design and implementation of sensor platform for uav-based target tracking and obstacle avoidance,” *Drones*, vol. 6, no. 4, 2022, Art. no. 89. doi: 10.3390/drones6040089.

69. M. Quigley, M. A. Goodrich, S. Griffiths, A. Eldredge, and R. W. Beard, “Target acquisition, localization, and surveillance using a fixed-wing mini-UAV and gimballed camera,” in *Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Robot. Automation*, IEEE, 2005, pp. 2600–2605.

70. Z. A. Ali, H. Zhangang, and W. B. Hang, “Cooperative path planning of multiple UAVs by using max-min ant colony optimization along with cauchy mutant operator,” *Fluctuation Noise Lett.*, vol. 20, no. 1, 2021, Art. no. 2150002. doi: 10.1142/S0219477521500024.

71. R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, “Particle swarm optimization: An overview,” *Swarm Intell.*, vol. 1, no. 1, pp. 33–57, 2007. doi: 10.1007/s11721-007-0000-0.

72. H. Duan and P. Qiao, “Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning,” *Int. J. Intell. Comput. Cybern.*, vol. 7, no. 1, pp. 24–37, 2014. doi: 10.1108/IJICC-02-2014-0005.

73. W. Cai, Z. Liu, M. Zhang, and C. Wang, “Cooperative artificial intelligence for underwater robotic swarm,” *Robot. Auton. Syst.*, vol. 164, no. 1, 2023, Art. no. 104410. doi: 10.1016/j.robot.2023.104410.

74. H. Qiu and H. Duan, "A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to UAV distributed flocking among obstacles," *Inf. Sci.*, vol. 509, no. 6, pp. 515–529, 2020. doi: 10.1016/j.ins.2018.06.061.
75. K. A. Ghamry, M. A. Kamel, and Y. Zhang, "Multiple UAVs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization," in *2017 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. (ICUAS)*, IEEE, 2017, pp. 1404–1409.
76. S. Vijh, P. Gaurav, and H. M. Pandey, "Hybrid bio-inspired algorithm and convolutional neural network for automatic lung tumor detection," *Neural Comput. Appl.*, vol. 35, no. 33, pp. 23711–23724, 2023. doi: 10.1007/s00521-020-05362-z.
77. R. Wang and J. Liu, "Adaptive formation control of quadrotor unmanned aerial vehicles with bounded control thrust," *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 30, no. 2, pp. 807–817, 2017. doi: 10.1016/j.cja.2017.01.007.
78. J. Li, X. Li, and Q. Su, "Fault detection filter design for discrete-time switched time-delay systems with static quantizer and quantized feedback," *Int. J. Innovat. Comput., Inf. Contr.*, vol. 14, no. 4, pp. 1465–1479, 2018.
79. Z. Ali, D. Wang, and M. Aamir, "Fuzzy-based hybrid control algorithm for the stabilization of a tri-rotor UAV," *Sensors*, vol. 16, no. 5, 2016, Art. no. 652. doi: 10.3390/s16050652.
80. J. Zhang and J. Yan, "A novel control approach for flight stability of fixed-wing UAV formation with wind field," *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 2098–2108, 2021. doi: 10.1109/JSYST.2020.3002809.
81. C. Zhao, S. Dai, G. Zhao, S. Liu, and J. Wen, "Cluster space formation control for multiple quadrotors based on fuzzy PD control algorithm," in *Proc. 2019 Chin Autom. Congr. (CAC)*, Hangzhou, China, IEEE, Nov. 2019, pp. 4146–4151.
82. A. Sargolzaei, A. Abbaspour, and C. D. Crane, "Control of cooperative unmanned aerial vehicles: Review of applications, challenges, and algorithms," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 229–255.
83. Y. Li, G. Zhou, W. Chen, and S. Zhang, "Design of UAV close formation controller based on sliding mode variable structure," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, Switzerland: Springer, 2017, pp. 463–476.

84. C. Zhu, X. Liang, L. He, and L. Liu, “Demonstration and verification system for UAV formation control,” in Proc. 2017 3rd IEEE Int. Conf. Control Sci. Syst. Eng. (ICCSSE), Beijing, China, IEEE, Aug. 2017, pp. 56–60.

85. J. Wang, L. Han, X. Li, X. Dong, Q. Li and R. Zhang, “Time varying formation of second-order discrete-time multi-agent systems under non-uniform communication delays and switching topology with application to UAV formation flying,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 14, no. 14, pp. 1947–1956, 2020. doi: 10.1049/iet-cta.2020.0183.

86. T. V. Pham and T. D. Nguyen, “Path-following formation of fixed-wing UAVs under communication delay: A vector field approach,” *Drones*, vol. 8, no. 6, 2024, Art. no. 237. doi: 10.3390/drones8060237.

87. R. K. Vander Meer and L. E. Alonso, “Pheromone directed behavior in ants,” in *Pheromone Communication in Social Insects*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1998, pp. 159–192.