

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**  
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
Кафедра інженерії програмного забезпечення

**Пояснювальна записка**  
до магістерської роботи  
на ступінь вищої освіти магістр

на тему: **«РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ  
ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАПАТІВ ПРИ  
ВИРІШЕНІ ЗАДАЧ ЗЙОМКИ МІСЦЕВОСТІ »**

Виконав: студент 6 курсу, групи ПДМ-61  
спеціальності

121 Інженерія програмного забезпечення  
(шифр і назва спеціальності)

Назаренко М.А.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Золотухіна О.А.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**  
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ**  
**ТЕХНОЛОГІЙ**

Кафедра Інженерії програмного забезпечення

Ступінь вищої освіти - «Магістр»

Спеціальність - 121 Інженерія програмного забезпечення

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
інженерії програмного  
забезпечення

\_\_\_\_\_ О.В. Негоденко  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

\_\_\_\_\_ Назаренко Максим Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка методу автоматизованої побудови траєкторії групи безпілотних літальних апаратів при вирішенні задач зйомки місцевості»

Керівник роботи Золотухіна Оксана Анатоліївна, доцент, к.т.н, завідувач кафедри системного аналізу

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу від “13”10 2020 року №230

2. Строк подання студентом роботи 24.12.2020

3. Вихідні дані до роботи: Автоматизована побудова траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості.

---

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

1. Огляд літератури і аналіз існуючих методів побудови траєкторії групи БПЛА

2. БПЛА як об'єкт адаптивного управління.

3. Розробка інфраструктури групи безпілотних літальних апаратів

4. Розробка методу автоматизованої побудови траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості

5. Перелік графічного матеріалу

1. Огляд і аналіз існуючих аналогів
2. Блок-схема потоку даних в комбінованій системі БПЛА
3. Алгоритм автономного польоту БПЛА
4. Блок-схема інфраструктури (GCS), що базується на архітектурі БПЛА
5. Архітектура БПЛА стільникової мережі
6. Фрагменти регіону
7. Порівняння способів планування маршруту
8. Математична модель побудови траєкторії
9. Наростання цінностей при використанні функцій
10. Висновки

6. Дата видачі завдання 02.11.2020

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської Роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	02.11.20	
2	Огляд і аналіз існуючих досліджень групи БПЛА	09.11.20	
3	Проектування руху БПЛА	13.11.20	
4	Проектування архітектури системи групи БПЛА	24.11.20	
5	Розробка автоматизованої побудови траєкторії групи БПЛА	27.11.20	
6	Оформлення пояснювальної записки		
7	Розробка демонстраційних слайдів	12.12.20	
8	Попередній захист роботи	18.12.20	
9	Здача роботи в деканат	24.12.20	

Студент \_\_\_\_\_ Назаренко М.А

( підпис )

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Золотухіна О.А.

підпис )

(прізвище та ініціали)





## РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи 85 с., 30 рис., 1 табл., 76 джерел.

*Об'єкт дослідження* – процес автоматизованої побудови траєкторії групи безпілотних літальних апаратів при вирішенні задач зйомки місцевості.

*Предмет дослідження* – методи автоматизованої побудови траєкторій групи безпілотних літальних апаратів при вирішенні задач зйомки місцевості.

*Мета роботи* – підвищення якості автоматизованої побудови траєкторії групи безпілотних літальних апаратів при вирішенні задач зйомки місцевості.

*Методи дослідження* – методи моделювання траєкторії, методи проектування та побудови траєкторії.

В роботі проведено аналіз основних процесів управління групи БПЛА. Розглянуто та проаналізовано існуючі методи реалізації групового управління групи БПЛА, їх класифікація і сфери застосування, розроблений алгоритм автономного польоту БПЛА, спроектовано процес прокладання маршруту в регіоні.

Розроблений метод дозволяє автоматизовано будувати траєкторію групи БПЛА для зйомки місцевості.

*Галузь використання* – процеси побудови траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості в сільськогосподарській та військовій сферах.

МОДЕЛЮВАННЯ, ГРУПИ БПЛА, МЕТОД, ПРОЕКТУВАННЯ,  
УПРАВЛІННЯ, ТРАЄКТОРІЯ.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ</b> .....	9
<b>ВСТУП</b> .....	10
<b>1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БПЛА</b> .....	11
1.1 Аналіз дослідження «Управління роєм БПЛА» .....	11
1.2 Аналіз дослідження «Огляд нових результатів спільного управління БПЛА» .....	12
1.3 Аналіз дослідження «Огляд важливих питань у комунікаційних мережах БПЛА» .....	13
1.4 Аналіз дослідження «3D спільне планування руху з урахуванням швидкості руху з використанням декількох БПЛА» .....	14
1.5 Аналіз дослідження «Оптимальне спільне планування шляху безпілотних літальних апаратів за допомогою паралельного генетичного алгоритму» .....	15
1.6 Аналіз дослідження «Планування завдань та руху БПЛА за наявності перешкод та пріоритетних цілей» .....	16
1.7 Аналіз дослідження «Fly-by-Logic: управління багатодронними флотами з логічними цілями» .....	19
1.8 Аналіз дослідження «Виявлення зіткнень для БПЛА на основі сіток ГерSOT-3D» .....	20
1.9 Аналіз дослідження «Рої безпілотних літальних апаратів» .....	23
1.10 Аналіз дослідження «Прогнозована маршрутизація для динамічних мереж БПЛА» .....	24
1.11 Аналіз дослідження «Інтернет-генерація та навігація шляхів для групи БПЛА» .....	27
1.12 Аналіз дослідження «На шляху до безпечності, ефективності та безперешкодної реконфігурації ройових формувань БПЛА» .....	28
1.13 Аналіз дослідження «Адаптована платформа для автономії та формування роїв БПЛА» .....	29
1.14 Аналіз дослідження «Штучний інтелект та теорія ігор контролю автономності групи БПЛА» .....	30
1.15 Аналіз дослідження «Планування шляху безпілотного апарату з використанням нового алгоритму колонії мурашок» .....	31
1.16 Аналіз дослідження «Гра безпілотників: теоретичні підходи до ігор для розподілу завдань із декількома роботами в місіях безпеки» .....	32
1.17 Аналіз дослідження «Про проблему безперервного покриття для групи БПЛА» .....	34
1.18 Аналіз дослідження «Гнучка та динамічна архітектура планування місій для координації групи БПЛА» .....	35

1.19	Аналіз дослідження «Метод моделювання та оцінки надійності місії безпілотного літального апарата, орієнтованої на систематичну та мережеву місію».....	35
1.20	Аналіз дослідження «Огляд архітектури зв'язку безпілотних літальних апаратів та протоколів маршрутизації» .....	36
1.21	Аналіз дослідження «Оптимізація структури групового польоту безпілотних літальних апаратів» .....	37
<b>2.</b>	<b>БПЛА ЯК ОБ'ЄКТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ</b> .....	<b>39</b>
2.1	Застосування БПЛА .....	39
2.2	Класифікація БПЛА .....	43
2.2.1	Використання БПЛА в умовах надзвичайної ситуації.....	49
2.2.2	Моніторинг та інспекція інфраструктури БПЛА.....	50
2.2.3	Використання БПЛА в наукових дослідженнях .....	52
2.2.4	Використання БПЛА в сільському господарстві.....	53
2.2.5	Використання БПЛА для оборони та безпеки .....	54
<b>3.</b>	<b>РОЗРОБКА ІНФРАСТРУКТУРИ ГРУПИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ</b> .....	<b>56</b>
3.1	Система управління БПЛА .....	56
3.2	Архітектура спілкування групи БПЛА .....	60
3.3	Інфраструктура архітектури групи БПЛА.....	61
<b>4.</b>	<b>РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БПЛА ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ ЗЙОМКИ МІСЦЕВОСТІ</b> .....	<b>65</b>
4.1	Особливості використання БПЛА в сільському господарстві та їх переваги.....	65
4.2	Розробка алгоритму та побудова траєкторії групи БПЛА.....	67
4.3	Розробка математичної моделі побудови траєкторії групи БПЛА.....	75
	<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>80</b>
	<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b> .....	<b>81</b>



## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

ПЗ – Програмне забезпечення

GPS – Global Positioning System

NDVI – Normalized difference vegetation index

## ВСТУП

За останні роки безпілотні літальні апарати заявили про себе як цінні та придатні платформи для багатьох сільськогосподарських, цивільних та військових застосувань. Їх все частіше залучають для спостереження за місцевістю та патрулювання кордонів. На поточний момент БПЛА використовують на одиночних місіях, але ефективніше використовувати групи БПЛА, так як можна охопити більшу територію для зйомки місцевості та потратити набагато менше часу.

Метою роботи є розробка ефективного методу автоматизованої побудови траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості. Об'єкт дослідження – процес автоматизації побудови траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості. Предмет дослідження – розробка методу автоматизованої побудови траєкторій групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості.

Існуючі методи побудови траєкторії групи БПЛА мають певні недоліки: відсутність вибору БПЛА за критеріями (наприклад, за швидкістю, за дальністю польоту, за габаритами і т.д.), відсутність вибору найбільш ефективної траєкторії польоту, відсутність вибору найшвидшого польоту місцевості, відсутність синхронізації між БПЛА та втручання людини під час польоту. Таким чином, розробка методу автоматизованої побудови траєкторії польоту БПЛА представлено в даній магістерській роботі було сформульовано з урахуванням особливостей існуючих методів польотів БПЛА. При розробці методу використовувалися сучасні підходи до моделювання та проектування траєкторії польотів групи БПЛА. Використання методу розраховано на сільськогосподарську та військову сфери.

# 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БПЛА

## 1.1 Управління роєм безпілотних літальних апаратах

В статті [1] автор схиляється на те, що контроль над групою БПЛА – відкрита проблема. В роботі він досліджує проблему обмеженого втручання користувача, а також представляє розробку та реалізацію групового управління БПЛА в повністю реалізованому імітованому середовищі БПЛА.

На рисунку 1.1 показано знімок змодельованого середовища та його графічного інтерфейсу управління.

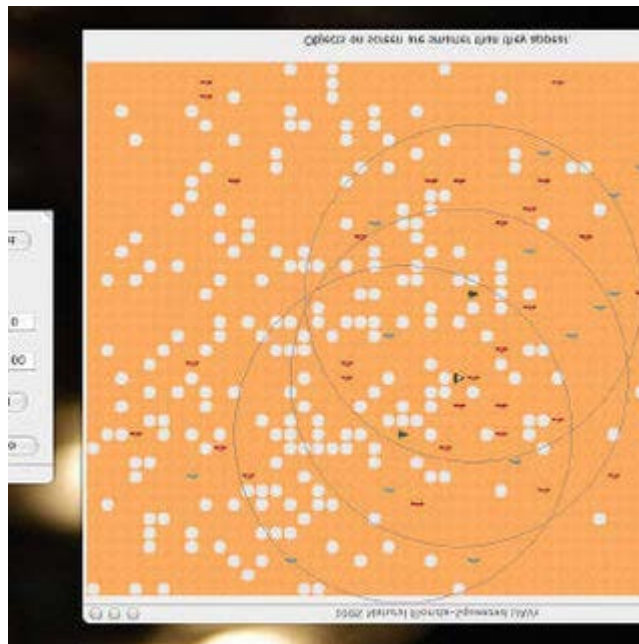


Рис.1.1. - Знімок екрану моделювання БПЛА

Проект імітує ситуацію, коли кілька БПЛА повинні знаходити і відстежувати кілька наземних транспортних засобів. Знайшовши наземний транспортний засіб, його слід «відсканувати» протягом певного періоду часу, щоб імітувати збір інформації про ціль. У разі втрати цілі і пізніше

знаходження її, сканування може бути продовжено там, де припинилося. У процесі сканування брати участь може будь-який БПЛА.

Система групи БПЛА, по суті, є організацією колективного розуму, контрольованим циклом програми. Однак окремі рішення контролюються окремими БПЛА.

## **1.2 Огляд нових результатів спільного управління БПЛА**

В статті [2] автор пише, що недорогі БПЛА з фіксованим крилом стають все більш корисними в операціях дистанційного зондування. Вони є більш дешевою альтернативою пілотованим засобам і ідеально підходять для небезпечних або монотонних місій, що було б недоцільно для пілота-людини.

Групи БПЛА представляють особистий інтерес через їх здатність координувати одночасне охоплення великих територій або співпрацювати для досягнення таких цілей, як картографування. Співпраця та координація в групах БПЛА також дозволяє дедалі більшій кількості літаків експлуатувати один користувач. Конкретними завданнями, які розглядаються для груп БПЛА, що співпрацюють, є патрулювання кордону, пошук та порятунок, спостереження, передача зв'язку та картографування ворожої території. Кооперативна проблема управління БПЛА представляє додатковий інтерес через проблеми розподіленого управління бездротовими мережами, нелінійну динаміку польоту легких літальних апаратів із закріпленими крилами та сприйняття глибини в режимі реального часу.

У цій роботі розглядається питання спільного управління групами БПЛА в зондуючих додатках. У цих додатках використовуються невеликі БПЛА з нерухомими крилами з можливістю обробки на борту, зором або GPS-навігацією та бездротовим зв'язком.

Програми наголошують на спілкуванні, зондуванні та груповому контролі, щоб безпечно домовлятися про невідоме середовище та ефектно збирати інформацію. Тому рішення включають протоколи бездротового

зв'язку, надійні алгоритми комп'ютерного зору, навігацію на основі зору розподіленні стратегії управління для масштабованості великих груп.

Основні проблеми міграції на БПЛА пов'язані з фізичним обмеженням платформи та суворі вимоги додатків до реального часу. Зазвичай неможливо носити значну кількість обладнання через обмеження розміру, ваги та потужності. У той же час надзвичайно важливо обробляти вхід датчика в режимі реального часу. Зіткнення та уникнення перешкод є основою безпечного польоту БПЛА.

В статті автор наголошує що, у міру того, як обчислювальна техніка та апарат бездротового зв'язку стають меншими та дешевшими, БПЛА і надалі залишатимуться бажаними в нових додатках та на заміну пілотованих літальних апаратів, із збільшенням вимог до автономності та надійності. Вони залежатимуть від постійного прогресу в галузі комп'ютерного зору, навігації на основі зору та виявлення перешкод, а також розподіленого управління на борту. Повинні бути розроблені системні архітектури, що дозволяють здійснювати навігацію, картографування та обробку несправностей як на груповому, так і на індивідуальному рівні.

### **1.3 Огляд важливих питань у комунікаційних мережах БПЛА**

У статті [3] говориться, що БПЛА мають величезний потенціал у суспільній та цивільній сферах. Вони корисні у програмах, де в іншому випадку людські життя можуть бути під загрозою. Системи з декількома БПЛА можуть спільно виконувати місії більш ефективно та економічно порівняно з одиничними системами БПЛА.

Значна частина робіт, проведених у сферах мобільних спеціальних мереж (MANET) та транспортних спеціальних мереж (VANET), не стосуються унікальних характеристик мереж БПЛА. Мережі БПЛА можуть варіюватися від повільної динаміки до динаміки; мають переривчасті ланки та топологію рідини. Мережа, що визначається програмним забезпеченням (SDN), може

полегшити гнучке розгортання та управління новими послугами та допомогти зменшити вартість, підвищити рівень безпеки та доступність мереж.

Вимоги до маршрутних мереж БПЛА виходять за межі потреб MANETS та VANETS. Потрібні протоколи, які адаптуються до високої мобільності, динамічної топології, переривчастих зв'язків, обмежень живлення та зміни якості зв'язку. БПЛА можуть вийти з ладу, і мережа може стати розділеною, що робить допуск затримок та збоїв важливим фактором проекту.

На відміну від багатьох інших бездротових мереж, топологія мереж БПЛА залишається незмінною із зміною кількості вузлів і зв'язків, а також відносних позицій вузлів, що змінюються. БПЛА можуть рухатися з різною швидкістю залежно від програми, це може спричинити переривчасте встановлення посилань. Які виклики може спричинити така поведінка? По-перше, деякі аспекти архітектурного дизайну не були б інтуїтивно зрозумілими. Топологія рідини, зникаючі вузли та витончені зв'язки – все це закликає вийти за межі звичайних спеціальних мереж. По-друге, протокол маршрутизації не може бути простою реалізацією ініціативної або реактивної схеми. Магістраль між БПЛА повинна неодноразово реорганізуватися, коли БПЛА виходить з ладу. У деяких випадках мережа може бути розділена. Тоді проблемою було б направити пакет від джерела до пункту призначення, одночасно оптимізуючи обрану метрику. Третім викликом буде підтримка сеансів користувачів шляхом їх безперервного переведення з БПЛА, що не працює, на активний БПЛА.

#### **1.4 3D спільне планування руху з урахуванням швидкості руху з використанням декількох БПЛА**

Планування руху є найважливішою темою при застосуванні БПЛА пошукових та рятувальних місій, транспортних місій тощо. Автор статті [4] висвітлює проблему планування руху, яка зосереджена на плануванні шляху та уникненні зіткнень між БПЛА.

Модель на основі Ляпунова представляє чудові рішення. Однак встановлення розумних параметрів для моделі, як правило, ґрунтується на досвіді. Більше того, БПЛА, контрольовані моделями, зазвичай повільно сходяться до пунктів призначення. Алгоритми евристичного планування також є основними підходами до керування БПЛА. Однак вони навряд чи розглядають кінетику БПЛА. У цій статті пропонується розподілений алгоритм, що враховує швидкість, та алгоритм запобігання зіткненням для обслуговування планування руху декількох БПЛА. Алгоритм, що враховує швидкість, генерує шляхи з векторами прискорення, які сходяться до заздалегідь визначених пунктів призначення. Алгоритм запобігання зіткненням буде спрацьовано для захисту БПЛА від зіткнень, коли передбачаються конфлікти шляху.

Порівняно з ієрархічною моделлю управління та схожими на Ляпунова законами контролю, такий підхід може покращити можливість успіху виконання місії для БПЛА. У той же час алгоритми допомагають БПЛА пройти коротший шлях і менше часу для безпечного пересування до пунктів призначення.

### **1.5 Оптимальне спільне планування шляху безпілотних літальних апаратів за допомогою паралельного генетичного алгоритму**

Деякі роботи та автономні машини розгортаються для виконання місій у небезпечних середовищах, таких як операції на атомних електростанціях та космічні дослідження, а також для спостереження та розвідки сил противника на полі бою.

Виробництво розумного безпілотного літального апарата (БПЛА) важливо для зменшення людських втрат та травм. Одним з основних викликів для розвитку БПЛА є планування шляху у ворожому середовищі. У методі планування пошуку шляху, при якому не відбувається зіткнення з перешкодами або іншими БПЛА, виявляється складним. Планування шляху

для автономних систем виконується на основі двох різних областей, найпоширеніша з яких базується на геометрії та кінематиці систем. У цій категорії планування шляху виконується з використанням середовища (перешкоди), і основною метою є, як правило, пошук найкоротшого шляху без зіткнення, що має важливе значення в геометрії системи. Ще однією областю планування шляху є динаміка системи, так що динамічні рівняння включають систему як обмеження в рівняння планування шляху, і отриманий шлях також повинен відповідати динамічним рівнянням. У цьому випадку також можна ввести межі вихідного моменту двигуна в динамічні рівняння.

Метою планування шляху є отримання шляху з мінімальним споживанням енергії, мінімальною кінетичною енергією або мінімальним ривком. Перший тип зазвичай використовується для додатків у режимі реального часу.

У цій статті [5] представлений простий, але вживаний метод з використанням PGA для планування групового шляху БПЛА. По-перше, було зазначено, як сформувати карту ймовірностей, використовуючи визначення трьох подій, а після створення карти ймовірності було виражено функцію витрат. Функція витрат - це лінійна комбінація ймовірності нейтралізуючих БПЛА, довжини шляху та експоненційного члена для врахування їх відстані. Генетичний алгоритм, використаний у цій роботі, незалежно від того, планування шляху дво- чи тривимірне, він пропонує пропорційні дво- чи тривимірні коди, і кожен напрямок має свій спеціальний код.

У цьому дослідженні було проведено чотири різних моделювання, в яких кількість, карта ймовірностей, перешкоди навколишнього середовища та кількість БПЛА розглядалися як змінні.

## **1.6 Планування завдань та руху БПЛА за наявності перешкод та пріоритетних цілей**



В статті [6] вирішено проблему взаємопов'язаного призначення завдань та планування руху, пов'язаної з присвоєнням команди безпілотних літальних апаратів до набору пріоритетних цілей в середовищі з перешкодами. Передбачається, що розташування цілей та початкові пріоритети визначаються за допомогою мережі наземних датчиків без нагляду, що використовуються для виявлення потенційних загроз у зонах обмеженого доступу. Цілі характеризуються рівнем важливості, що змінюється в часі, і обмеження часу повинні бути виконані, перш ніж транспортному засобу дозволено відвідати конкретну ціль.

Передбачається, що транспортні засоби несуть фіксовані на кузові датчики, і, отже, їм потрібно наближатися до призначеної цілі, летячи прямо і рівно. Фіксовані крилаті літальні апарати змодельовані як транспортні засоби Dubins, тобто мають постійну швидкість і обмеження на мінімальний радіус повороту. Досліджувана інтегрована проблема призначення завдань та планування руху поставлена у вигляді дерева рішень, і запропоновано два алгоритми пошуку: вичерпний алгоритм, який покращує час роботи та забезпечує мінімальне рішення, закодоване у дереві, та жадібний алгоритм, який забезпечує швидке можливе рішення. Щоб задовольнити обмеження часу відвідування цілі, передбачений алгоритм планування руху подовження шляху серед перешкод. Використовуючи моделювання, ефективність алгоритмів порівнюється, оцінюється та ілюструється. Приклад вершин видовження наведено на рисунку 1.2.

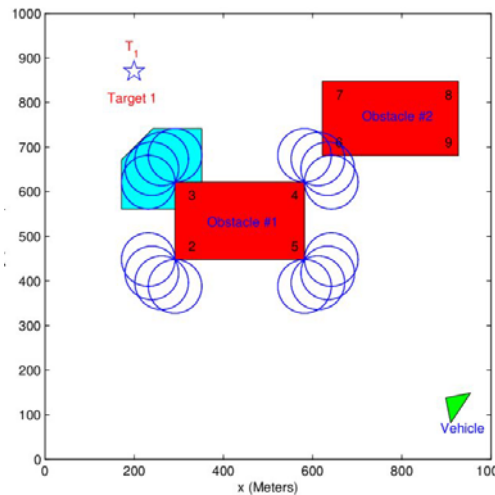


Рис.1.2. - Приклад вершин видовження: Мінімальний радіус повороту  
= 60 м

Цей приклад включає транспортний засіб, ціль і дві прямокутні перешкоди. На кожній з вершин Перешкоди 1 зображені двигуючі кола. Кожне коло відповідає конкретній здійсненій орієнтації транспортного засобу (у цьому прикладі було використано 30-градусну дискретизацію діапазону можливих кутів). Як бачимо, Вершину 3 можна визначити як вершину подовження, тоді як Вершина 4 не є частиною цього набору, оскільки кілька кружляючих кіл у цій вершині перетинаються з Перешкодою 2.

У цій роботі вивчалася взаємопов'язана проблема призначення та планування шляхів БЛА для відвідування цілей (що мають різні за часом пріоритети) в середовищі з перешкодами. Передбачалося, що транспортні засоби несуть фіксовані датчики, і, отже, їм потрібно наближатись до призначеної цілі, рухаючись прямо та на рівні.

Для вирішення часової залежності пріоритету цілей була сформульована цільова функція, що включає можливу довжину шляху транспортних засобів та початковий пріоритет цілей. Було запропоновано два алгоритми розподілу завдань: вичерпний алгоритм пошуку, який забезпечує оптимальне (найнижчу вартість) рішення, і жадібний алгоритм, який забезпечує швидке можливе рішення (також використовується як верхня межа).

Підпрограма планування руху на основі пошуку впорядкованої множини вершини цілей та перешкод, що використовується як частина рішення завдання і забезпечує реальні шляхи руху транспортних засобів. Часові обмеження цілей були вирішені шляхом надання алгоритму подовження траси серед перешкод.

За допомогою моделювання було порівняно ефективність алгоритмів, продемонстровано та досліджено вплив пріоритету цілей, що змінюються в часі, на процес розподілу завдань. Хоча жадібний алгоритм забезпечує неоптимальне рішення, він корисний у великомасштабних сценаріях реального часу, де обчислювальний час роботи є суттю. Вичерпний алгоритм може надати негайне рішення, яке покращує тривалість роботи для великомасштабних сценаріїв, або може бути використаний в офлайн-сценаріях.

Слід зазначити, що, оскільки модель Dubins використовувалась для представлення кінематики БПЛА, подібні моделі, можливо, використовувались для представлення руху інших транспортних засобів, що рухаються в площині (наприклад, наземних транспортних засобів), і, отже, розроблені алгоритми призначення руху та завдання використовується.

## **1.7 Fly-by-Logic: управління багатодронними флотами з логічними цілями**

В даній статті [7] автор вказує на проблему безпечного планування та управління мультиагентними системами, що в різних місіях є надзвичайно важливою, оскільки обсяг завдань, покладених на такі системи, збільшується. У цій роботі представляється підхід до вирішення цієї проблеми для місій з чотирма квадрантами. Враховуючи місію, виражену в часовій логіці сигналу (STL), даний контролер максимізує стійкість, щоб генерувати траєкторії для квадрантів, які задовольняють специфікацію STL у безперервному часі. Автор також показує, що обмеження даної оптимізації гарантується, що ці

траєкторії можна відстежувати майже ідеально за допомогою готових контролерів позиції та відношення нижчого рівня. Цей підхід дозволяє уникнути надто спрощених абстракцій, знайдених у багатьох методах планування, зберігаючи виразність місій, закодованих у STL, що дозволяє вирішувати складні просторові, часові та реактивні вимоги. Шляхом експериментів, як в моделюванні, так і на реальних квадрокоптерах, в роботі демонструється продуктивність, масштабованість та застосовність даного методу в реальному часі.

Оскільки технологія автономних систем починає розвиватися, передбачається, що вони будуть виконувати різноманітніші завдання. На рисунку 1.3 показаний сценарій, коли кілька квадрокоптерів повинні виконувати різноманітні місії в загальному повітряному просторі, включаючи доставку пакетів, спостереження та моніторинг інфраструктури.

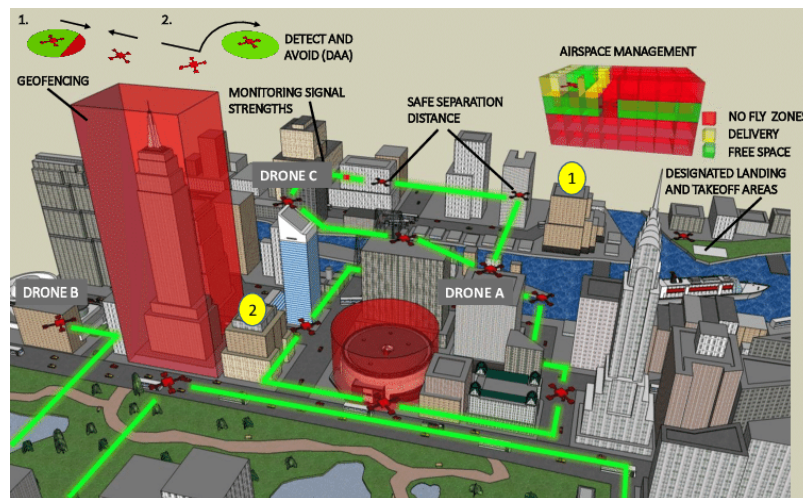


Рис.1.3. - Кілька автономних місій безпілотників у міському середовищі

Дрону А доручено доставити пакунок, який він повинен зробити протягом 15 хвилин, а потім повернутися до бази в наступні 10 хвилин. На Drone В покладено завдання періодичного спостереження та збору даних дикої природи в парку, а на Drone С - збору даних датчиків з обладнання на біло-блакитній будівлі. Всі ці дозволи мають складні просторові вимоги

(наприклад, уникати перекриття будівель, виділених червоним кольором, здійснювати спостереження або моніторинг певних територій та підтримувати безпечну відстань від кожного іншого), часові вимоги (наприклад, кінцевий термін доставки пакету, періодичність відвідування районів, що підлягають моніторингу) та реактивні вимоги (наприклад, уникнення зіткнень).

## 1.8 Виявлення зіткнень для БПЛА на основі сіток GeoSOT-3D

В статті [8] автор вказує, що збільшення кількості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) призвело до проблем, пов'язаних з вирішенням проблеми зіткнення для забезпечення безпеки повітряного руху. Традиційні підходи, що застосовуються для виявлення зіткнень, страждають від двох основних недоліків: по-перше, обчислювальне навантаження парного обчислення експоненціально зростає із збільшенням кількості просторових сутностей; по-друге, існуючі підходи на основі сітки непридатні для складних сценаріїв з великою кількістю об'єктів, що рухаються з високою швидкістю.

У запропонованій моделі вперше було визначено БПЛА та інші просторові об'єкти за допомогою сіток GeoSOT-3D (рисунок 1.4).

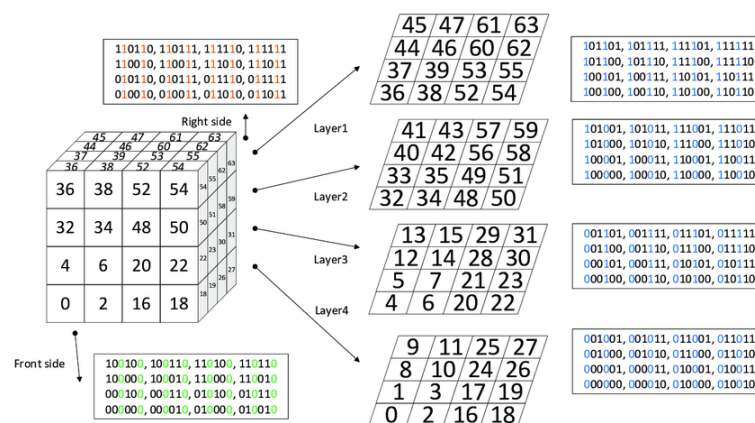


Рис.1.4. - Детальна ілюстрація сіток GeoSOT-3D на рівні 2. Коди тривимірних сіток позначені на поверхні куба та на чотирьох окремих шарах.

Бінарні коди також перелічені для лицьової сторони, правої сторони та кожного шару

По-друге, нереляційна просторова база даних була ініціалізована за допомогою багатофункціональної стратегії, а просторово-часові дані були вставлені із кодами сітки GeoSOT-3D як первинним ключем. По-третє, процедура виявлення зіткнень була перетворена з попарного обчислення на багаторівневий запит. Було проведено чотири імітаційні експерименти для перевірки доцільності та ефективності запропонованої моделі виявлення зіткнень для БПЛА в різних середовищах. Результати також показали, що 64-метрові сітки GeoSOT-3D є найбільш підходящим базовим розміром сітки, і зменшення споживання часу порівняно з традиційними методами досягало приблизно 50–80% у різних сценаріях.

Досліджуваний повітряний простір включає різні категорії інформації (наприклад, інші літаки та погодні умови). Кожна просторова сутність представлена однією або кількома сітками GeoSOT-3D відповідно до зайнятих сіток. Похибки вимірювання позицій рухомих цілей, таких як БЛА, існують через велику кількість просторових збурень (включаючи атмосферу, освітленість та гравітацію) та здатність управління. Коли під час відбору проб існує лише абсолютна інформація про положення, не враховуючи похибки вимірювання, у процесі картографування рухомих об'єктів та обчислення їх взаємних зв'язків можуть виникати відсутні або помилкові виділення. Отже, моделювання просторових об'єктів повинно враховувати не тільки просторове розташування об'єкта, а й невеликий простір, що оточує об'єкт. Отже, основним блоком розділення в тривимірному каркасі є сітка підрозділу; тобто всі тривимірні просторові об'єкти складаються з однієї або декількох сіток підрозділу, як показано на рисунку 1.5.

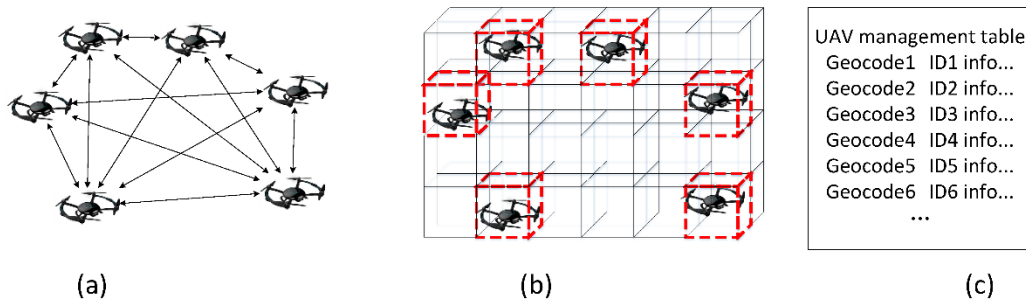


Рис.1.5. - Традиційний метод розрахунку та метод просторових запитів на основі бази даних для виявлення зіткнення безпілотних літальних апаратів. Традиційні методи виявлення зіткнень залежать від попарних розрахунків на основі тривимірних координат (а). Складність розрахунку швидко зростає, оскільки збільшується кількість БПЛА. Метод, заснований на сітці, спрощує процедуру виявлення зіткнень як процес порівняння просторових сіток звичайного розміру (b).

У процесі виявлення нові дані, такі як дані траєкторії БПЛА та дані перешкод, повинні бути вставлені після перетворення в коди GeoSOT-3D.

Таким чином, коефіцієнт обчислень значно покращується. Після виявлення зіткнень нові коди вставляються як нові стовпці замість нових рядків. Запропонований метод передбачає не тільки потенційні зіткнення з трафіком, але й інші категорії сутностей у досліджуваному повітряному просторі.

## 1.9 Рої безпілотних літальних апаратів

Безпілотні літальні апарати або безпілотники мають велике різноманіття, залежно від базових рамок та їх конкретних специфікацій.

Мета дослідження, що представлена в статті [9] - проаналізувати основні характеристики групи безпілотників та виміряти рівень обізнаності громадськості щодо цих роїв. Для досягнення цих цілей виділено функціональність, проблеми та важливість безпілотників.

Також представлені результати експериментального опитування групи академічного населення, які демонструють, що групи безпілотників є фундаментальною програмою майбутнього і будуть прийняті з плином часу.

Рій або флот безпілотних літальних апаратів (БПЛА) - це набір повітряні роботи, тобто безпілотники, які працюють разом для досягнення певної мети. Кожен безпілотник у рої приводиться в рух певною кількістю роторів та має можливість вертикального наведення, зльоту та посадки (VTOL).

Політ безпілотників контролюється або вручну, тобто за допомогою дистанційного керування, або автономно за допомогою процесорів, розгорнутих на безпілотники. Загальним призначенням для безпілотників є військове, але їхні цивільні заявки останнім часом привертають підвищену увагу. Дійсно, недорогі безпілотники та їх рої є перспективними платформа для інноваційних дослідницьких проєктів та майбутніх комерційних додатків, які допоможуть людям у їхній роботі та повсякденному житті.

На рис. 1.6 показано ієрархічний рій квадрокоптерів у моделі польоту / операції лідера, підпорядкованого. Це дозволяє одному користувачеві контролювати рух і формування цілого рою через лідер-безпілотник, за допомогою інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу дистанційного керування. Цей рій самоорганізується структура, що має поведінку багатоагентної системи управління. Принцип формування літака пов'язаний з віддаленим користувачем / оператором та система бездротового зв'язку між оператором та роєм.

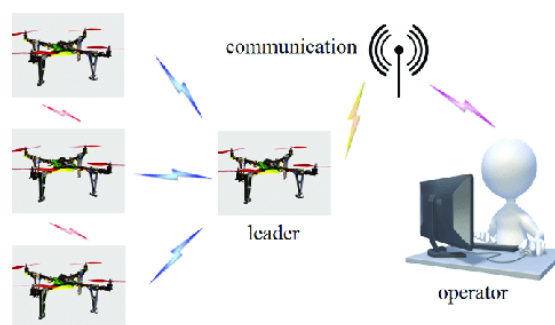


Рис.1.6. - Приклад ієрархічного рою безпілотників



Для прикладу на рисунку 1.6 є лише один керівник безпілотної, який керує групою підлеглих робочих безпілотної. Як правило, ієрархія може бути набагато складнішою, наприклад, складатися з декількох кластерів, кожен із яких має власних лідерів і декілька шарів лідерів утворюючи «суперкластери» різного розміру. Кожен дрон у рої може безпосередньо спілкуватися зі своїми однолітками на одному рівні ієрархії та з його безпосереднім керівником безпілотної апаратом. Лідер-безпілотної на вищому рівні рівень ієрархії спілкуються з наземним сервером, обмінюючись даними, зібрані та попередньо оброблені роєм та розповсюджуваними цілі місії, що надаються сервером.

### **1.10 Прогнозована маршрутизація для динамічних мереж БПЛА**

Засновані Flying Ad-Hoc Networks (FANET) надають ефективні інфраструктурні рішення для широкого кола військових та комерційних застосувань. Ці мережі, як правило, складаються з високошвидкісних безпілотної літальних апаратів (БПЛА) і утворюють динамічні топології мережі. Такі алгоритми маршрутизації не ефективно враховують ці постійні топологічні зміни та демонструють погані показники затримки.

У цій роботі [10] автор представляє оптимальний алгоритм маршрутизації для БПЛА із системами зв'язку в черзі, заснованими на найкоротшому алгоритмі Дейкстри, як основний крок до розробки повністю передбачуваної платформи зв'язку.

Далі автор оцінює вплив невизначеності вимірювань на вибір оптимального шляху та на результуючу наскрізну затримку. Результати моделювання підтверджують вищу ефективність затримки запропонованого алгоритму порівняно зі звичайними алгоритмами маршрутизації. Покращення є більш важливим, коли розмір мережі більший, відносні вузли розвитку вищі, а середній час очікування в буферах передачі довший.

В статті розглядається широкомасштабна мережа БПЛА, що складається з безлічі роїв БЛА. Рой БПЛА включає в себе безліч БЛА з різним і доповнюючим обладнанням, які в цілому і колективно виконують складне завдання. Тому рій утворює локальну підмережу із відносно м'якими змінами топології. Тому використовується звичайна маршрутизація для зв'язку всередині рою. З іншого боку, різним теплом присвоюються незалежні траєкторії руху, а отже, вони утворюють надзвичайно динамічну топологію. Тому передбачувана маршрутизація використовується для групового зв'язку.

Автор дотримується популярної кластерної інфраструктури, де інформаційний потік включає три частини: 1) від вихідного вузла до відповідної кластерної головки; 2) від вихідної кластерної головки до цільового кластера; 3) сформований пункт призначення кластера до вузла призначення. Ці частини показані на рисунку 1.7. Проблеми вибору правильної кластерної головки та виконання звичайної маршрутизації добре вивчені в літературі, і основна увага в цій роботі полягає в розробці прогнозного алгоритму маршрутизації для другої частини ланцюга зв'язку.

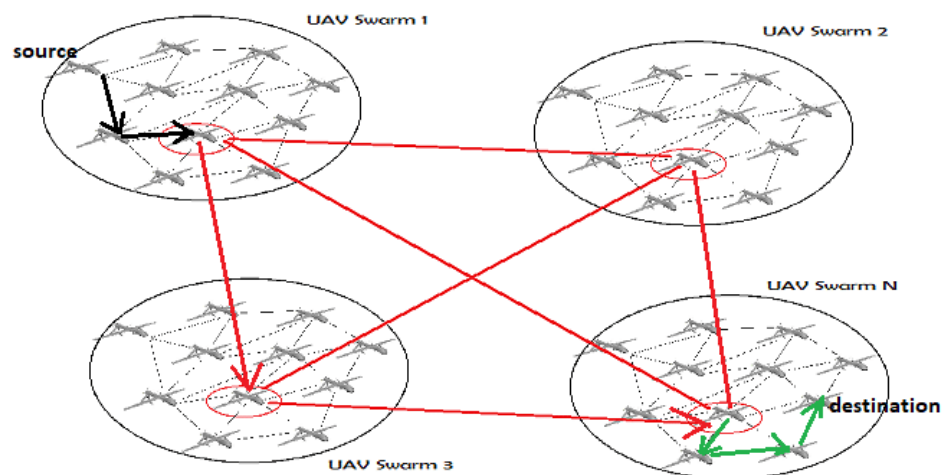


Рис.1.7. - Запропонована модель системи для великомасштабної мережі БПЛА, яка складається з безлічі роїв БПЛА

Звичайний метод маршрутизації заснований на стандартному алгоритмі найкоротшого шляху Дійкстри, який знаходить найкоротший шлях від

вихідного вузла до пункту призначення (або до всіх існуючих вузлів в іншому варіанті цього алгоритму) в графіку контактів. Графік та пов'язані з ним ребра вважаються фіксованими під час виконання алгоритму. Це припущення впливає з незначної варіації попарних відстаней вузлів під час сеансу передачі в зв'язку, орієнтованій на з'єднання, або під час передачі через пакет в зв'язку без зв'язку.

Функціонування цього алгоритму базується на призначенні значень відстані для всіх вузлів. Усі вузли позначені як невідвідані та всі ініціалізовані зі значеннями нестабільності, за винятком вихідного вузла, якому присвоєно нульове значення відстані. Потім значення відстані всіх сусідів джерела оновлюються, просто додаючи значення відстані вузлів джерела до ваги сполучного краю. Після оновлення всіх сусідів вихідного вузла вузол джерела позначається відвіданим, а один із сусідніх вузлів із найменшим значенням відстані вибирається як поточний вузол. Той самий процес повторюється для нового поточного вузла. Під час оновлення значення відстані вузла, якщо нове значення більше, ніж попереднє значення, уникається оновлення. Алгоритм визначається, коли цільовий вузол позначений як відвіданий (або всі вузли, позначені як відвідані в іншому варіанті цього алгоритму). Цей інтуїтивний алгоритм є дуже ефективним і є основним ядром більшості найкоротших алгоритмів. Однак в цьому алгоритмі не вдається знайти найкоротший шлях у надзвичайно динамічних мережах, де метричні межі піддаються значним змінам, особливо в системах зв'язку. Рисунок 1.8 ілюструє сценарій відмови.

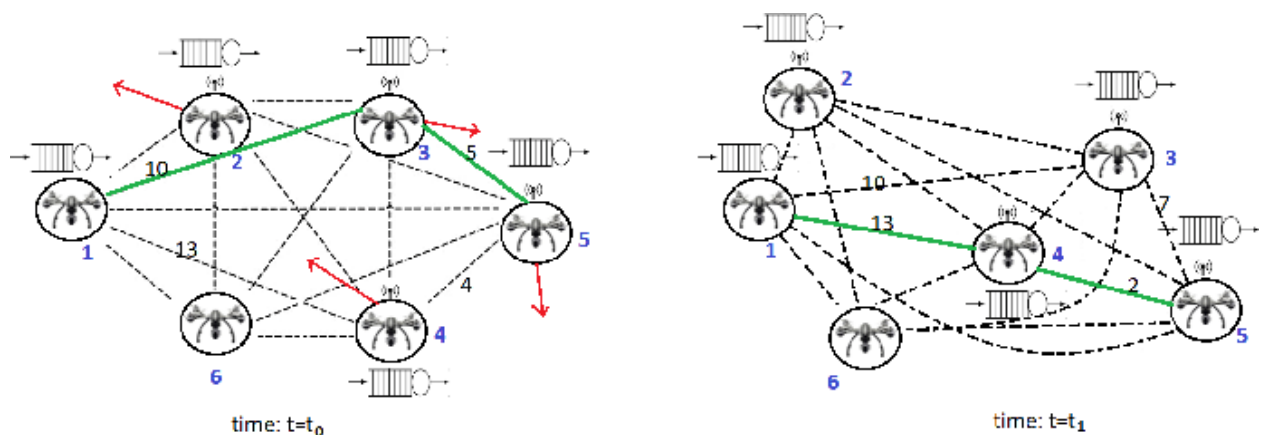


Рис.1.8. - Вплив зміни топології мережі БПЛА на оптимальний шлях від вихідного вузла n1 до вузла призначення n5

### **1.11 Інтернет-генерація та навігація шляхів для групи БПЛА**

Зі зростанням популярності безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для споживчих застосувань, кількість аварій за участю БПЛА також швидко зростає. Тому безпека руху БПЛА стала основною проблемою для операторів БПЛА. Для рою БПЛА безпечна експлуатація не може бути гарантована без запобігання зіткненню БПЛА один з одним і статичним та динамічно виникаючим рухомим перешкодам у зоні польоту.

В статті [11] автор представляє онлайн-систему зіткнення та систему навігації для роїв БПЛА. Запропонована система використовує географічне розташування БПЛА та успішно виявлених, статичних та рухомих перешкод для прогнозування та уникнення наступного: зіткнення БПЛА з БПЛА, зіткнення БПЛА зі статичним перешкодою та зіткнення БПЛА з рухомою перешкодою. Такий підхід до прогнозування зіткнень використовує ефективний моніторинг виконання та складну обробку подій (СЕР) для своєчасного прогнозування. Відмінною рисою запропонованої системи є її здатність передбачати потенційні зіткнення та попередньо знаходити найкращі способи уникнути передбачуваних зіткнень, щоб забезпечити безпеку всього рою. Також представляється реалізація запропонованої системи на основі моделювання разом з експериментальною оцінкою, що включає ряд експериментів, і порівнюємо ці результати з результатами чотирьох існуючих підходів.

Результати показують, що запропонована система успішно прогнозує та уникає всіх трьох видів зіткнень в режимі онлайн. Більше того, вона генерує безпечні та ефективні маршрути БПЛА, ефективно масштабується до великих проблемних випадків, і підходить для захищених зон польоту та для сценаріїв, що включають високий ризик зіткнення БПЛА.

### **1.12 На шляху до безпечної, ефективної та безперешкодної реконфігурації ройових формувань БПЛА**

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) викликали великий інтерес за останні роки завдяки численним сферам потенційного застосування. У наш час дослідники цікавляться групами БПЛА, що працюють разом. Співпраця між БПЛА відкриває широке поле можливостей, оскільки вони, як правило, здатні виконувати більш складні завдання, ніж один БЛА. Однак співпраця між безліччю БПЛА залишається складним завданням, і перед їх основним прийняттям належить вирішити значні проблеми. Наприклад, автоматична реконфігурація рою може бути використана для адаптації рою до мінливих вимог програми для більш ефективного та результативного вирішення завдання. Однак шанси зіткнення стають високими, якщо реконфігурація не буде ретельно спланована.

У цій статті [12] автор пропонує підхід, що дозволяє змінювати форму формування БПЛА під час польоту за допомогою обчислювального недорогого методу, який здатний значно зменшити шанси зіткнення. Під час експериментів тестували різні події реконфігурації, схильні до зіткнень. Результати показали, що такий підхід підтримує безпечну відстань (більше 5 метрів) між БПЛА, зберігаючи при цьому обмежений час на кілька десятків секунд. Крім того, тести на масштабованість довели, що такий підхід може одночасно виконувати реконфігурацію щонайменше 25 БПЛА.

### **1.13 Адаптована платформа для автономії та формування роїв БПЛА**

Це поточне дослідження, яке було представлено в статті [13], заглиблюється в автономний рой безпілотних літальних апаратів (БПЛА), який відповідає вимогам місії та рухається у формаціях на основі вводу

користувача. Автор використовує комерційне готове обладнання (COTS) та програмне забезпечення з відкритим кодом, щоб створити доступну платформу для потенційного використання в комерційних та дослідницьких програмах. Система є масштабованою, з можливістю формування рою як у статичній, так і в динамічній конфігурації з використанням планування шляху в режимі реального часу та оптимізованого призначення цілей.

Група БПЛА, що використовується в цьому дослідженні, складається з декількох квадрокоптерів, кожен з яких оснащений бортовим комп'ютером, контролером польоту та телеметричними та GPS-модулями COTS. Команди надсилаються в рій через наземну станцію. Наземна станція та БПЛА здійснює зв'язок за допомогою зв'язку Wi-Fi.

Система продемонструвала планування шляху з можливістю запобігання зіткненням за допомогою моделювання. Це дослідження показує за допомогою моделювання та частково шляхом експериментів, що автономію роїв можна впровадити ефективно та економічно. Це створює легкий доступ для використання безлічі БПЛА для різноманітних додатків, включаючи 3D-відображення та пошук та порятунок на різних місцевостях із зростаючими труднощами. Завдяки інтеграції інших датчиків та приладів цей рій може бути використаний для вимірювання різноманітних параметрів, визначення цілей та створення формувань навколо них для найкращого вивчення цілей у районах, де наземна навігація та оглядові точки не є оптимальними.

#### **1.14 Штучний інтелект та теорія ігор контролю автономності групи БПЛА**

Автономні безпілотні літальні апарати (БПЛА), що працюють як рій, можуть бути розгорнуті в суворих умовах, де кібермагнітна діяльність часто вимагає швидких і динамічних налаштувань рійових операцій.

Використання центральних контролерів, механізмів синхронізації БПЛА або заздалегідь запланованого набору дій для управління роєм у таких

розгортаннях перешкоджатиме його здатності надавати очікувані послуги. Автор статті [14] вводить алгоритми керування польотом на основі штучного інтелекту та теорії ігор, якими повинен керувати кожен автономний БПЛА, щоб визначати свої дії майже в реальному часі, покладаючись лише на місцеву просторову, часову та електромагнітну (em) інформацію. Кожен БПЛА, що використовує такі алгоритми управління польотом, позиціонує себе таким чином, що рій підтримує зв'язок між мобільною спеціальною мережею (Manet) та рівномірний розподіл активів по території, що цікавить.

Типові завдання для роїв, що використовують ці алгоритми, включають виявлення, локалізацію та відстеження мобільних передавачів. В статті представляється офіційний аналіз, який показує, що ці алгоритми можуть керувати роєм, щоб підтримувати зв'язаний manet, сприяти рівномірному розповсюдженню мережі, уникаючи перенаселення іншими членами рою. В статті також доводиться, що вони підтримують підключення до Manet, і в той же час вони можуть змусити рій автономних БПА слідувати або уникати передавача. Симуляційні експерименти в моделювальній програмі ornet підтверджують результати формального аналізу, що наші алгоритми здатні забезпечити адекватне покриття площі через мобільне джерело електромережі та підтримувати підключення до Manet. Ці алгоритми є хорошими кандидатами для цивільних та військових застосувань, які вимагають гнучких реакцій на зміни в динамічних середовищах для таких завдань, як виявлення, локалізація та відстеження мобільних передавачів.

### **1.15 Планування шляху безпілотною апарату з використанням нового алгоритму колонії мурашок**

При генерації найкращого шляху слід врахувати кілька пов'язаних питань, таких як безпека, перешкоди та час обчислень. Окрім своєї важливості, багато дослідників проводили алгоритми планування шляхів тривоги.

Алгоритми колонії мурашок, які були висвітлені в статті [15], широко використовуються для вирішення різноманітних задач оптимізації в різних областях, особливо в галузі інженерного проектування.

Алгоритм мурашиної колонії - це розумний алгоритм із механізмом позитивного зворотного зв'язку. Основний зміст включає побудову шляху та оновлення феромону. Після поглибленого вивчення алгоритму колонії мурашок пропонується алгоритм колонії мурашок із каральними заходами.

Основною особливістю цього карального заходу є те, що наприкінці кожного покоління мураха знаходить гірший рівень феромоневуляції, тим самим зменшуючи повторно дослідження цього шляху та збільшуючи можливість досліджувати невідоме. У цій роботі алгоритм MMAS та алгоритм AS-N використовуються для моделювання проблеми планування шляху безпілотного транспортного засобу в динамічному середовищі.

Нарешті, наведені результати моделювання та їх порівняння. Алгоритм AS-N забезпечує кращу індексацію при плануванні шляху безпілотного автомобіля(рис.1.9).

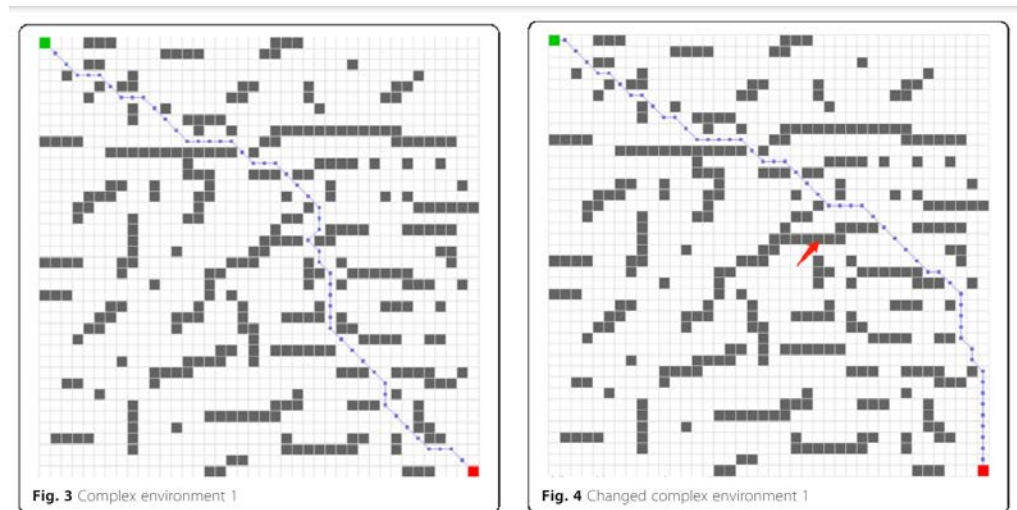


Рис.1.9. – а) Складне середовище б) Змінене складне середовище

В динамічному середовищі активна оклюзія мурашиного здійсненого шляху в експерименті, але мураха може швидко знайти здійснений шлях і



досягти цільової точки. Алгоритм AS-N не тільки може шукати оптимальний шлях у статичному оточенні, але також підтримує перевагу алгоритму в динамічному середовищі, а його пристосованість до змін середовища є також дуже високою.

### **1.16 Гра безпілотників: теоретичні підходи до ігор для розподілу завдань із декількома роботами в місіях безпеки**

В останні роки багатороботні системи застосовувались у багатьох сферах, таких як охорона, пошук та порятунок, моніторинг навколишнього середовища та сільське господарство. Переваги цих систем різноманітні: вони ефективніші - оскільки вони мають більше ресурсів для досягнення тих самих цілей, і ефективні - оскільки кожна задача може бути вирішена найкращим агентом, а також вони забезпечують гнучкість і толерантність до розподілу завдань. Проблема в системах із декількома роботами, особливо з великими флотами та роями. Цю проблему можна вирішити за допомогою декількох алгоритмів: централізованого або розподіленого, детермінованого або стохастичного, ринкового або суспільного. Рішення також залежить від критеріїв, що використовуються для оптимізації: відстань, час, споживання, координація.

В цій статті [16] враховується сценарій, коли пари дронів повині відвідувати безліч місць для виконання комплексу заходів. Наприклад, сфотографувати, щоб знайти жертву, і створити мережу, яка дозволить комунікацію в зоні стихійного лиха. Флот не можна підключити до станції через велику відстань, наявність тіньових зон та проблеми безпеки. Комунікація між безпілотниками обмежена, оскільки розмір флоту робить його непридатним і може спричинити проблеми безпеки. Місію можна виконати без вирішення всіх завдань, але продуктивність залежить від кількості вирішених завдань і часу на їх вирішення.

Робота досліджує потенціал теорії ігор для вирішення проблеми розподілу завдань у місіях із кількома роботами. Проблема розглядає рій з десятками безпілотників, які знають лише своїх сусідів, а також місію, яка полягає у відвідуванні ряду локацій та виконанні певної діяльності. Два алгоритми були розроблені та перевірені при моделюванні: один конкурентний та інший кооперативний. Перший шукає найкращу рівновагу Nash для кожного конфлікту, коли кілька БПЛА змагаються за кілька завдань. Другий встановлює систему голосування для перетворення індивідуальних уподобань у розподіл завдань із соціальним забезпеченням.

Результати моделювання показують, що обидва алгоритми працюють за обмеженням зв'язку та часткової інформації, але конкурентний алгоритм дає кращі розподіли, ніж кооперативний.

### **1.17 Про проблему безперервного покриття для групи БПЛА**

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) можуть використовуватися для забезпечення бездротової мережі та дистанційного спостереження за районами, що постраждали від стихійних лих. У такій ситуації БПЛА потрібно періодично повертатися до зарядної станції для підзарядки через обмежену ємність акумулятора.

В цій статті [17] вивчається проблема мінімізації кількості БПЛА, необхідних для безперервного покриття даної території, враховуючи вимогу до зарядки (рисунок 1.10).

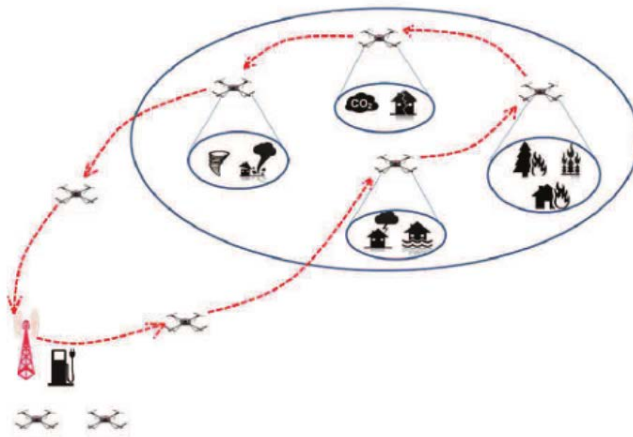


Рис.1.10. - Проблема безперервного покриття

Автор статті доводить, що ця проблема є NP-повною. Завдяки нерозбірливості автор вивчає розподіл графіку покриття на цикли, які починаються на зарядній станції. Спочатку охарактеризується мінімальна кількість БПЛА для покриття такого циклу на основі часу зарядки, часу в дорозі та кількості підрайонів, які повинен охопити цикл. На основі цього аналізу розробляється ефективний алгоритм, цикли з обмеженим енергетичним алгоритмом. Прямим методом безперервного покриття даної області є розбиття її на  $N$  підрайонів і покриття на  $N$  циклів з використанням  $N$  додаткових БПЛА.

Результати нашого моделювання досліджують важливість критичних параметрів системи: енергетична потужність БПЛА, кількість підпром'іжів у покритій зоні, а також час зарядки та руху БПЛА. Менше додаткових БПЛА порівняно з прямолінійним методом, оскільки збільшується енергетична потужність БПЛА, а на 67-71% менше додаткових БПЛА, оскільки збільшується кількість підрайонів.

### **1.18 Гнучка та динамічна архітектура планування місій для координації групи БПЛА**

У цій статті [18] представлена масштабована та гнучка архітектура для планування місій у реальному часі та динамічного підписання агента до завдання для безлічі безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Запропонована архітектура планування місій складається із Глобального планувальника місій (GMP), який відповідає за призначення та моніторинг різних місій високого рівня за допомогою Агентського планувальника місій (AMP), який відповідає за забезпечення та моніторинг кожного завдання місії кожному БПЛА у рої.

Завдання запропонованої архітектури полягає у виконанні місій високого рівня, таких як автономне розвідка багатоагентних засобів, автоматичне виявлення та розпізнавання цілей, пошук та порятунок та інші різні місії з можливістю динамічного перенастроювання місії в режимі реального часу. Запропонована архітектура була оцінена на основі моделювання та реальних внутрішніх поглядів, демонструючи свою стійкість у різних сценаріях та її гнучкість для перепланування місії в режимі реального часу та призначення динамічного агента до завдання.

### **1.19 Метод моделювання та оцінки надійності місії безпілотного літального апарата, орієнтованої на систематичну та мережеву місію**

В статті [19] автор вказує, що з розвитком автономності системи безпілотних літальних апаратів (БПЛА), технології мережевих комунікацій та теорії групової розвідки виконання місії у формі рою БЛА стане важливим втіленням майбутніх застосувань. Традиційні методи моделювання надійності місії з одним БПЛА не змогли задовольнити вимоги моделювання надійності місії рою БПЛА. Тому пропонується метод моделювання та оцінки надійності місії рою БПЛА.

Спочатку, спрямована на взаємозалежність між різними шарами, встановлюється багат шарова мережева модель рою БПЛА. У той же час, базуючись на системі, що має такі характеристики - використовуючи

ланцюжок місій для завершення місії та застосовуючи зв'язок мережі місій, встановлюється модель мережі місій рою БПЛА. По-друге, вразливість та зв'язок обираються як два показники, що відображають надійність місії, і спрямовані на випадкові атаки та навмисні атаки, пропонуються методи оцінки вразливості та зв'язку.

Нарешті, достовірність та точність побудованої моделі перевіряються за допомогою моделювання, а модель та вибрані показники можуть відповідати вимогам надійності місії рою БПЛА.

Таким чином, це дослідження надає кількісні посилання на роботу з прийняття рішень, пов'язаних з БПЛА, та підтримує розвиток роботи, пов'язаної з БПЛА.

## **1.20 Огляд архітектури зв'язку безпілотних літальних апаратів та протоколів маршрутизації**

За останні десятиліття безпілотні літальні апарати (БПЛА) досягли видатних показників у військових, комерційних та цивільних цілях. БПЛА все частіше з'являються у вигляді роїв або формувань, що відповідають вищим вимогам місії. Зв'язок відіграє важливу роль у контролі та координації роїв БПЛА. Архітектура зв'язку визначає спосіб обміну інформацією між БПЛА або між БПЛА та центральним центром управління. Протоколи маршрутизації допомагають забезпечити надійну наскрізну передачу даних. Тому особливо важливо розробити архітектуру зв'язку безпілотних БПЛА та протоколи маршрутизації з високою продуктивністю та стабільністю.

Ця оглядова стаття [20] детально описує чотири архітектури комунікацій, включаючи переваги та недоліки, а також запровадили три загальних внутрішньоройової архітектури зв'язку. Також обговорюються застосовні сценарії. Крім того, у цій роботі представлений систематичний огляд та техніко-економічне обґрунтування протоколів маршрутизації. Для стимулювання подальших досліджень також досліджуються відкриті питання

досліджень архітектури зв'язку безпілотників БПЛА та протоколів маршрутизації.

### **1.21 Оптимізація структури групового польоту безпілотних літальних апаратів**

У статті [21] аналізуються критерії ефективності для виконання завдань польоту групи БПЛА і застосування теорії графів для кількісної оцінки ефективності групового польоту БПЛА. Розроблено оптимізацію групових операцій БПЛА в залежності від цільового призначення, наприклад, фото моніторингу площі місцевості. Було розраховано критерії ефективності групового польоту для всіх типів з'єднань БПЛА (зірка, кільце, змішана).

## 2 БПЛА ЯК ОБ'ЄКТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

### 2.1 Застосування БПЛА

З кожним роком БПЛА займають все більше і більше місця у військовій і в цивільній сфері про що свідчить недавній огляд міжнародних авіаційних салонів [22].

Зараз БПЛА дуже активно розвивається, про що свідчить велика кількість демонстрованих у світі зразків. На багатьох міжнародних конференціях особливу увагу надають саме безпілотним літальним апаратам і навіть віддають кращі місця їхнім секторам. На думку міжнародних експертів безпілотна авіація починає домінувати у світі над пілотованою, і особливо це стосується військової сфери.

Наразі сучасна класифікація і термінологія вже не відображає реальний стан речей на ринку БПЛА і існує деяка плутанина в поняттях. Тому багато країн світу вводять власну термінологію і класифікацію в даній галузі. Для прикладу, прийнятий в США в 2005 році документ «Перспективи розвитку дистанційно-керованих і безпілотних літальних апаратів з погляду з погляду Військово-повітряних Сил США» ставить перед розробниками безпілотних систем задачу створення термінології в цій галузі. В цьому документі визначаються основні напрями розвитку й інтеграції технологій розробки цього сегмента авіації. До основної переваги слід віднести високі електронні технології, що впроваджуються в при виробництві обладнання і системи БПЛА, і що дають можливість використовувати апарати у складних умовах.

Офіційна термінологія БЛА прийнята деякими регуляторами Федеральної авіаційної адміністрації (FAA) під різними назвами та аббревіатурами, такими як безпілотний літак, робот-літак, дистанційно керовані машини, тоді як термін "безпілотник" походить від військових. Закон FAA про модернізацію та реформи 2012 року визначає безпілотні літальні апарати як "літальні апарати, які експлуатуються без можливості

безпосереднього втручання людини зсередини або на борту літака [23]". Канцелярія міністра оборони США у своїй Дорожній карті безпілотних літальних апаратів (БПЛА) від березня 2003 р. Використовує таке визначення: «Механічний повітряний транспортний засіб, який не має оператора людини, використовує аеродинамічні сили для забезпечення підйому транспортного засобу, може літати автономно або може бути дистанційно керований, може бути витратним або відновлювальним та може нести смертельну або несмертельне корисне навантаження. Балістичні або напівбалістичні машини, крилаті ракети та артилерійські снаряди не вважаються безпілотними літальними апаратами». У опублікованому керівництві британці визначають БПЛА як «літак, який спроектований або модифікований для перевезення людей-пілотів і експлуатується під дистанційним управлінням або в обмеженому автономному режимі експлуатації. [24]». Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) та Європейська Комісія визначають БЛА як частину ширшої технології безпілотного літального апарату, яка може бути запрограмована на автономну роботу [25].

Дрони, як правило, оснащені різноманітним набором камер, таких як потужне та легше відео, інфрачервоні камери, які згодом надсилають актуальні дані на наземне обладнання з корисним навантаженням або без нього. Вони зазвичай оснащені системою IMU/GPS або доступом до даних Google Earth, датчиками теплової потужності/потужності/відстані/фотографії з високою роздільною здатністю та друкованою платою з програмним забезпеченням IP для запису даних у захищеному форматі. Широкий спектр тахіметрів, альтиметра, мобільних гарячих точок, RFID-міток та інших передових технологій використовується як в аерокосмічній промисловості, так і в БАС. Взагалі кажучи, вони виконують широкий спектр завдань, але відрізняються за формою, вартістю та можливостями залежно від їх призначення. Дрони мають форму невеликого мультикоптера з різноманітним набором розмірів, злітають вертикально або з фіксованим крилом, або з поворотним крилом, і з багатьма роторами, щоб літати і балансувати, поки



вони працюють від досліджуваних батарей, що працюють від безщіткового електродвигуна. Більшість із них - це дистанційно керовані, автономні або напівавтономні, тоді як деякі з них можуть рухатися, парити або сідати з мінімальним необхідним втручанням людини. Людському пілоту дозволено програмувати наземне управління за допомогою комунікаційного обладнання, такого як планшет, бортові комп'ютери та смартфон із підключенням Wi-Fi або радіокерованим літаком хобі типу на низькій висоті та дисплеєм за допомогою кнопок, перемикачів та віртуальних звуків . Деякі з них керують повністю автономними місіями з планом польоту та часом, беручи до уваги вимірювання крила, рівня літєво-полімерної батареї, національні правила польотів та дані майданчика, поперечні перешкоди на основі штучних інтелектуальних моделей з невеликою кількістю викопного палива або без нього.

Новітні технології дозволяють безпілотникам приземлятися автономно та легко транспортуватися назад або вручну. Техніка безвідмовної роботи часто перевіряє якість сигналів наземного радіоуправління, і якщо сигнал втрачається, безпілотник переходить у режим наведення; через кілька секунд дрон повертається, як голуб-самонавід, туди, куди він злетів і автоматично приземляється [26].

Оператор може використовувати кнопку «повернутися додому», і безпілотник повернеться до координат зльоту на заданій висоті і автоматично приземлиться [26].

Важливо розуміти потенційне використання безпілотників для комерційного застосування. Автори докладають зусиль для вирішення найважливіших етапів у категорії безпілотних літальних апаратів протягом історії. Класифікація доступних БПЛА була вартою уваги і постійною потребою поза громадою безпілотників, оскільки Everaerts [27] забезпечив вичерпний перелік безпілотників: повітряно-десантні та супутникові платформи, БПЛА з малою та високою висотою. Це дослідження аналізує, що категорії охоплюють широкий діапазон, який відрізняється спектральною

роздільною здатністю, гнучкістю, місями дистанційного зондування, якістю, економічною вартістю, просторовою точністю, ціллю, швидкістю оновлення та охопленням. У геологічній галузі Eisenbeiss [28] представляє короткий зміст, який надає основних учасників, що відокремлюють сценарії застосувань на силових та безмоторних, важчих та легших ніж повітряні платформи. За даним дослідженням, програми класифікувались за такими ознаками: маневреність, витривалість, погода та вітер. Є кілька вартих уваги ініціатив Ван Блайенбурга [29], в яких зазначено, що безпілотники класифікуються на основі розміру, ваги, діапазону дії та сертифікації, а також визначає дві різноманітні екосистеми: нано-мікро-міні та БПЛА з близькою, короткою і середньою діапазоном. Інша класифікація стосується оператора: цивільний чи військовий [30]. Крім того, існують дві категорії за типом польоту, такі, насамперед, роторні літаки або нерухоме крило [31]. Нарешті, вони класифікуються за розмірами, що варіюються в довжині та вазі, та за корисним навантаженням, що стосується несучих датчиків, аналізаторів спектра, відеокамер.

Обумовлена відсутністю стандартизації для безпілотників до певної міри, гармонізована регуляторна панорама значно посилилася за останні роки. Вичерпний огляд категоризації та класифікації цивільних безпілотних літальних систем встановлений ISO / AWI 21895 [32], але все ще знаходиться в стадії розробки. Далі останні події та рішення є доказом активної роботи, проведеної ISO. Прогрес ISO об'єднує ISO / TC 20 / SC 16 / WG 1, ISO / TC 20 / SC 16 / WG 2, продукт (керівник: Даг Девіс, США) [33] та ISO / TC 20 / SC 16 / WG 3, Процедура (керівник: Боб Гарбет, Великобританія) [34], які все ще розробляються. Більш конкретно, ISO / TC 20 / SC 16 / WG 1 [35] визначає загальні вимоги до БПЛА для цивільних та комерційних застосувань. ISO / TC 20 / SC 16 / WG 2 визначає вимоги до виготовлення конструкції та постійної льотної придатності будь-якого БПЛА. Він включає літальний апарат, будь-яку пов'язану з ним дистанційну пілотну станцію (станції), необхідні лінії управління та управління на будь-які інші елементи системи, які можуть

знадобитися. Сфера дії ISO / TC 20 / SC 16 / WG 3 визначає вимоги до експлуатаційних процедур БПЛА.

## 2.2 Класифікація БПЛА

За останні 50 років геодезичні та інженерні вимірювальні технології здійснили п'ять квантових стрибків: електронний вимірювач відстані, тахеометр, GPS, роботизований тахеометр та лазерний сканер. Безпілотні авіаційні системи або безпілотники стануть шостим квантовим стрибком у технології [36].

БПЛА продемонстрували можливість роботи в темряві, тумані та важких ситуаціях із зменшеною видимістю. Крім того, ця платформа вважається ідеальною для аерофотозйомки районів в обмеженому повітряному просторі за допомогою акселерометра та гіроскопа, коли пілотований вертоліт не може працювати. Посилаючись на безліч нових класів приладів, деякі з них можуть отримати доступ до конструкцій за допомогою систем автоматичного управління навігацією. Ці ділянки занадто малі, високі та важко доступні для пілотованих літальних апаратів (верхівка берегів або дна долини) або багатоспектральних уявних супутників, щоб підійти зблизька. Цей вибух електронних інтригуючих та найбільш опублікованих технологій веде до швидко розростаючого ринку пошуково-рятувальних завдань, моніторингу стану водних об'єктів, шосейних доріг, охорони природи.

Безпілотне мобільний засіб функціонує не абсолютно самостійно, а в складі комплексу, куди можуть входити ще інші безпілотні мобільні засоби, центр управління, диспетчерські пункти, ретрансляційні вузли, станції підзарядки, засоби транспортування, запуску, посадки і т.д. Всі разом це прийнято називати UVS - Unmanned Vehicle System - безпілотна мобільна система [37]. Вони в свою чергу можуть бути дистанційно керованими або автономними. Їхня загальна назва – ROV – Remotely Operated Vehicle і AUV – Autonomous Unmanned Vehicle.

UAV (Unmanned Aerial Vehicles) вважається найбільш численнішою групою безпілотних мобільних засобів, UGV (Unmanned Ground Vehicles) – безпілотні наземні мобільні засоби та UMV (Unmanned Marine Vehicles) – безпілотні морські мобільні засоби. Також, можливі різні гібридні різновиди безпілотних мобільних засобів.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА, англійський термін: Unmanned aerial vehicle – UAV) – багаторазово реалізовує своє функціональне призначення без безпосереднього розміщення людини на борту з метою управління. Загальноприйняте поняття має досить широкий сенс і не завжди точно відображає специфіку літального апарата. Таким чином, у даний клас не включаються безпілотні модифікації серійних літаків, використовувані як повітряні мішені, а також всі види балістичних і крилатих ракет [38].

БПЛА функціонують не повністю самостійно, а в складі ВАК - відповідних авіаційних комплексів або БАС – безпілотних авіаційних систем, де велику роль відіграє вся інфраструктура і засоби забезпечення, а не лише сам літальний апарат.

За принципом польоту БПЛА можна розділити на 5 груп:

- БПЛА з жорстким крилом (БПЛА літакового типу)
- БПЛА з гнучким крилом
- БПЛА з обертовим крилом (БПЛА вертолітного типу)
- БПЛА з махаючим крилом
- БПЛА аеростатичного типу

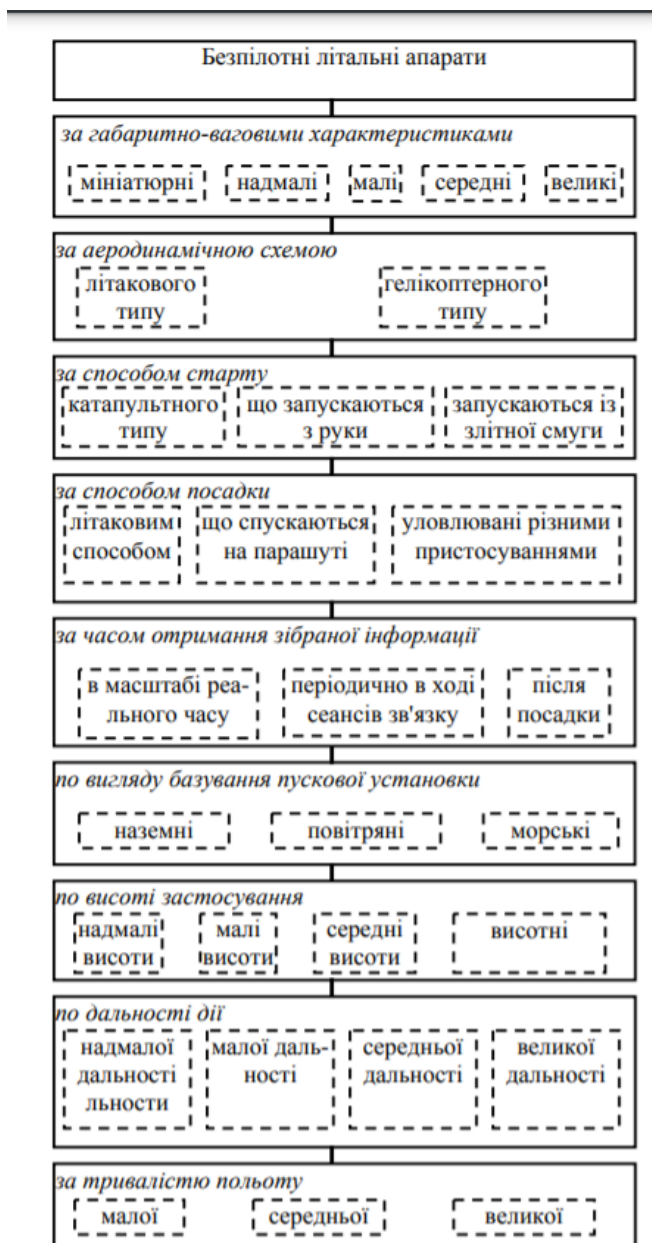


Рис.2.1. – Класифікація БПЛА по технічних ознаках

Таблиця 2.1 – Загальна характеристика категорій БПЛА

Категорія	Злітна маса, кг	Дальність польоту, км	Висота польоту, м	Дальність
1	2	3	4	5
Нано-БПЛА	Nano	<0,025	<1	100
Мікро-БПЛА	Micro (p)	<5	<10	250
Міні-БПЛА	Mini	5-150	<10	150

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
Легкі БПЛА для контролю переднього краю оборони	Close Range (CR)	25-150	10-30	3000
Легкі БПЛА з малою дальністю польоту	Short Range (SR)	50-250	30-70	3000
Середні БПЛА з великою тривалістю польоту	Medium Range Endurance (MRE)	500-1500	>500	8000
Маловисотні БПЛА для бойових дій	Low Altitude Deep Penetration (LADP)	250-2500	>250	9000
Тактичні	Маловисотні БПЛА з високою тривалістю польоту	Low Altitude Long Endurance	15-25	>500
	Середньовисотні БПЛА з великою тривалістю польоту	Medium Altitude Long Endurance	1000-1500	>500
Стратегічні	Висотні БПЛА з високою тривалістю польоту	High Altitude Long Endurance (HALE)	2500-5000	>2000
	Бойові (ударні) БПЛА	Unmanned Combat Aerial	>1000	1500

Найбільшого попиту здобули БПЛА категорії Mini. Це сприяло одразу декільком факторам, а саме:

- доступна ціна і простота їх експлуатації для великої кількості споживачів;
- вони ефективні для виконання різного типу завдань, як у військовій області, так і в цивільній.

Також безпілотники допомагають виявляти та картографувати регіон природних та інших видів аналізу ризиків катастроф, транспортної та сільськогосподарської авіації, лісових пожеж. Вони знаходять все більше застосування в галузі пошуку та порятунку. Крім того, вони революціонізують управління природними небезпеками, такими як торнадо, повінь чи землетрус, безпілотники з датчиками наближення. Вони підтримують допоміжні дії та моніторинг з метою переселення людей у віддалені та дикі райони (круті схили або перекриття дамб) та доставляють надзвичайні запаси та ліки. БПЛА ведуть до організації зв'язку та регулювання дорожнього руху у великих містах.

Вони часто використовуються для закритої аерофотозйомки з близької відстані та спостереження. Безпілотники, мабуть, визнані здебільшого для виписування рішень проблем із доставкою, і, як і інші типи роботизованих пристроїв, можуть бути розроблені для виконання інших операцій на основі інженерії дамб. Ці компактні пристрої з дистанційним управлінням можуть пропонувати втручання та спостереження, захищаючи майно від раптових небезпечних ситуацій, особливо від злочинів. Зважаючи на те, що багато дослідників та виробників готові будувати нові безпілотники для підтримки повсякденного життя, відсутність систематизованої категоризації не дозволяє операторам вибирати пристрій, який відповідає власним вимогам. Сектор безпілотників має значний потенціал, але помітне питання, яке виникає, полягає в тому, що може чи не може зробити дрон стосовно свого класу. Визначається п'ять потенційних секторів безпілотників: надзвичайні ситуації, спостереження за землею, моніторинг та інспекція інфраструктури, навколишнє середовище, оборона та безпека. Усі існуючі товари можна

сортувати за наступними детальними групами відповідно до їх метрики продуктивності, що спонукає мотивацію галузі. Кожен пристрій повинен мати певний набір специфікацій, основні подібності чи відмінності, щоб бути згрупованими у вищезазначених секторах. По-перше, представлені основні характеристики та основні технології кожного окремого сектору, детально враховуючи мотивацію та настрої громадськості. По-друге, у цьому підході деякі продукти демонструються з метою ілюстрації та ідентифікації основних відмінностей, які потрібно проводити серед категорій.

Класифікація товарної продукції:

1. Надзвичайна ситуація
  - Пошук і порятунок
  - Управління стихійними лихами
  - Гуманітарна допомога
  - Швидка допомога
2. Моніторинг та інспекція інфраструктури
  - Агенти з нерухомістю
  - Огляд лінії електропередач
  - Логістика
  - Страхування
3. Наука про Землю
  - Медіа-бізнес
  - Археологія
  - ГІС професіонали
4. Навколишнє оточення
  - Вологість ґрунту
  - Рівень газу
  - Сільськогосподарські студії
  - Моніторинг посівів
5. Оборона та безпека
  - Нагляд за дорожнім рухом



- Трубопровідний патруль
- Безпека порту

### 2.2.1. Використання БПЛА в умовах надзвичайної ситуації

Пожежники можуть керувати безпілотниками, щоб виявити когось із живих у палаючій будівлі. Приклад, що заслуговує на увагу, показаний на рис.2.2. Вони можуть допомогти пожежникам у безпечному доступі до пожежної будівлі, і вони виконують навігацію для координації не небезпечної простежуваної траєкторії польоту через вогонь. Більше того, безпілотні машини займаються моніторингом лісових пожеж та автоматичними маршрутними польотами.



Рис.2.2. – Процес гасіння пожежі в будівлі

Пошуково-рятувальні та аварійні місії з безпілотниками мають багато цілей. Безпілотники ведуть спостереження по локації, яке з часом слід спостерігати за географічно точними моделями, такими як ураган, виверження вулканів, землетрус або повеня. Поняття гуманітарної допомоги у дослідженні та моніторингу природних шкідливих явищ включає картографування повені, гіперспектральну візуалізацію, спостереження за потоком морського льоду та його розповсюдженням. Крім того, безпілотні машини мають доступ до дорожніх інформаційних систем, що збирають інформацію про погоду,

пожежу та повені, тоді як програмне забезпечення інтерфейсу зв'язку надсилає дані на наземну станцію.

Вантажні безпілотники можуть відігравати ключову роль у кур'єрських службах, роздрібній торгівлі та закладах гостинності, які виконують служби доставки, доставляючи певні товари. Наприклад, безпілотник швидкої допомоги, створений від Alec Momont, готовий до реагування на надзвичайні ситуації, як показано на рис. 3. Він зосереджений на найбільш актуальній ситуації: доставка автоматизованого зовнішнього дефібрилятора - куди призводить зменшення часу відгуку всього на одну хвилину до збільшення виживання на 10% [39].



Рис.2.3. – БПЛА швидкої допомоги

### 2.2.2. Моніторинг та інспекція інфраструктури БПЛА

Безпілотники допомагають розпізнати будь-які недоліки безпеки, питання регулювання та дотримання техніки безпеки в сфері будівництва. Будь-які галузі, які вимагають високоточних обстежень, такі як екологічні дані або моніторинг розливу хімічних речовин та нафти, можуть мати великі можливості, використовуючи БПЛА для постійного обстеження величезної кількості сільськогосподарських угідь. Промисловість може легко відстежувати незавершене виробництво, виявляти залишені матеріали або незначні зміни, швидко отримуючи тривимірний огляд моделі та відстежувати

великі об'єкти. Хорошим прикладом топографічного знімання поверхневих або об'ємних визначень, що мають місце, може бути звичайна станція, яка працює 2 дні по 24 години на добу на суші 16 000 тонн, тоді як для того самого продукту безпілотник працював би лише 2 години.



Рис.2.4. – БПЛА для моніторингу під час будівництва

Агенти з нерухомості можуть експлуатувати БПЛА для підтримки збору даних з повітря, моніторингу ділянок та віддаленого перегляду ландшафту, який продається або здається в оренду, пропонуючи легкий переклад інформації навіть досвідченим користувачем. Архітектори будинків можуть додавати тривимірні швидкісні креслення за допомогою безпілотника (рис.2.4) до своїх схем та об'ємних розрахунків.

Інспектори та регулювачі страхових компаній можуть експлуатувати безпілотники для спостережних заходів (наприклад, на дахах).

Дрони також допомагають у режимі реального часу стежити за логістикою. Прогрес у технології більш дешевих, легких теплових камер з меншим, легшим корпусом розширює використання безпілотника в цій галузі, тоді як тривалість польоту та напівлегка батарея є можливими обмеженнями. Безпілотники можуть надзвичайно заощадити час, коли йдеться про сканування великих або віддалених земель. Камери на рівні землі

встановлюються на телескопічному стовпі або портативному пристрої висотою 10 метрів.

БПЛА також допомагають в огляді ліній електропередач, і вони виявляються більш точними, економічними, простішими та швидшими ніж звичайні способи. Вони пропонують об'ємне сканування, кінцеві результати в AutoCAD, тепловізори та обладнання для 3D-лазерного сканування. Вони економлять життєво важливий час і дають клієнтам електричної мережі можливість зосередитись на питаннях ремонту та технічного обслуговування, що покращують безпеку. Дрони можуть допомогти інженерам-електрикам, механікам та сантехнікам в модернізації або заміні деталей електростанції.

### **2.2.3. Використання БПЛА в наукових дослідженнях**

Геодезисти та фахівці з ГІС можуть покластися на картографування БПЛА, щоб заощадити час та витрати на проекти геодезії та картографування. Час, необхідний для збору точних даних, різко зведений до мінімуму. Виробляючи точні докладні дані нижче рівня хмарності - цифрову форму з географічними посиланнями - геодезисти можуть збирати повторювані тривимірні хмари точок автономно під час невеликого польоту на якійсь поверхні. Відносно короткі часові рамки, проведені на рівні землі, свідчать про те, що безпека персоналу забезпечується шляхом оцінки небезпеки для геодезистів при виїзді на ділянки обліку, зазначені з місцем будівництва, фактичними формами схилів або інтенсивними шляхами руху за недорогого збору. Досягнення фотограмметричного програмного забезпечення та САД у безпілотноках допомагають у професійній ортофотографії. Інші додаткові заходи включають основні літологічні межі, виявлення відмінностей між схилами та запасом ґрунту та геоструктурні особливості, такі як ідентифікація геометрії схилу. Крім того, безпілотнок може допомогти вченим у галузі мікрофізики хмар, прогнозу погоди та метеорології, фізичної океанографії,

магнітних полів, рослинності, хімії озону, рівня радіації, забруднення тропосфери та якості повітря.

Медіа-компанії, такі як кіноіндустрія та тележурналісти, можуть управляти БПЛА, який демонструється для досягнення вражаючих аерофотознімків або відео в прямому ефірі. Ця літаюча платформа здатна створювати фотографії з високою просторовою роздільною здатністю у випадках, коли звичайного пілотованого вертольота для аерофотозйомки не існує або в районах, куди неможливо дістатися літаком чи літаком. Дрони також допомагають у повітряній рекламі та комерційній зйомці, а ілюстративний приклад показаний на рис.2.5.



Рис.2.5. – БПЛА для аерофотозйомки

Археологію можна підтримати за допомогою ортофотостерео, нанесеного на геологічну карту. БПЛА можуть програмувати студенти, які експлуатують новітні калібровані системи камер і сканують землю, до якої непросто дістатись, захоплюючи 2-D орто-фото-мозаїки з географічними посиланнями, 3-D дані, контурні лінії та перспективи дизайну.

#### **2.2.4. Використання БПЛА в сільському господарстві**

З більшою частотою ці пристрої можуть підтримувати оцінку стану здоров'я врожаю (рис.2.6), сільськогосподарські обстеження, відбивання

шкідників. Фермерам дозволяється проводити обстеження згенерованих безпілотниками карт, щоб розпізнати сільськогосподарські угіддя за варіацією врожаю та незначними змінами за допомогою цифрової моделі місцевості. БПЛА допомагає в оцінці першопричин збитків та пропонує рішення, ефективність пасовищ досить детально для подальшої перевірки. Крім того, фермерські експерти використовують супутники для моніторингу стану врожаю нижче рівня хмарності, а також можуть проводити моделі зрошення та дренажу за допомогою теплових камер.



Рис.2.6. – БПЛА для контролю здоров'я врожаю

Безпілотні літальні апарати знаходять все більше застосувань для наукових цілей та навчальної діяльності в наукових дослідженнях як для факультетів, так і для студентів. Використання БПЛА в лабораторіях, групових проектах, заняттях все ще нове, але набуває популярності. Ці високотехнологічні машини пропонують нові виміри, захоплюючи легко повторювані зображення для біології, дикої природи, ботаніки та сільського господарства. Нарешті, вони підтримують спостереження за потоком морського льоду, розподіл та відстеження шлейфу, візуалізацію вологості ґрунту та рівень аерозолі та газу в хмарах.

### **2.2.5. Використання БПЛА для оборони та безпеки**

З боку оборони, спостереження за дорожнім рухом (рис.2.7) - це швидко зростаюча зона для прийняття безпілотників. Безпілотні транспортні засоби

використовуються для передачі даних спостереження та планування, в той час як вони програмуються в режимі офлайн та поєднуються з навігацією в режимі реального часу. Поруч із екстреним сегментом, такі програми, як реагування на аварії/аварії/надзвичайні ситуації, вибирають найкращий маршрут над дорожньою мережею, відстежують мережу дорожніх сигналів, час подорожей, надають аварійні послуги автомобілів та інформують поліцію про найкращий маршрут, відстежують рух транспортних засобів на перехресті, вимірювання традиційної довжини черги, допомога у паркуванні, моніторинг потоків відправлення-призначення[40]. Безпілотники, призначені для управління дорожнім рухом, досягають неймовірних швидкостей, відносно меншої вартості, швидкі та безпечні, хоча їм не заважає мережа доріг, дуже погана погода або умови евакуації спрямовані на спостереження потоків, що збираються, швидкості, оцінку щільності руху та траєкторій руху транспортних засобів [40].

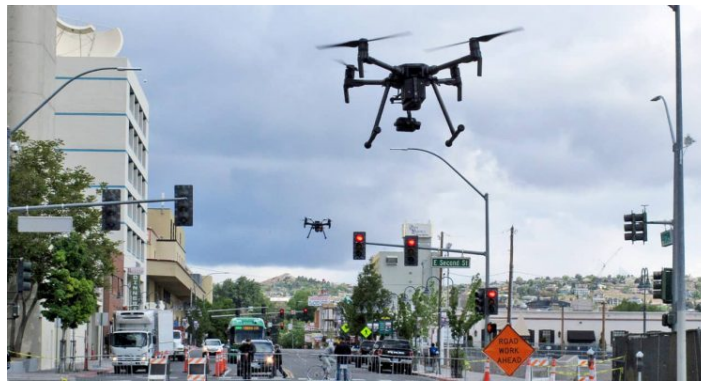


Рис.2.7. – Моніторинг руху БПЛА

Дронові інспекційні безпілотники використовуються як технологія блокування для вилову незаконних риболовних суден у природному регіоні. Вони дозволяють спостерігати з висоти пташиного польоту, допомагаючи постійно розподіленим силам нагляду урядової організації, які допомагають в інспекції чутливих місць, моніторингу, нагляді за внутрішнім рухом, патрулюванні трубопроводів та охороні порту. Нарешті, вони допомагають у ядерному, біологічному, хімічному зондуванні/відстеженні.

## 3 РОЗРОБКА ІНФРАСТРУКТУРИ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

### 3.1 Система управління БПЛА

БПЛА суттєво збільшили свою присутність в небі, і оскільки технології та політика продовжують розвиватися то їх кількість буде тільки збільшуватися. Спеціальною технологією, яка готується до ескалації є рій БПЛА. Вони мають потенціал розподіляти завдання та координувати роботу багатьох БПЛА з мінімальним втручанням оператора.

На рисунку 3.1 представлена блок-схема потоку даних в комбінованій системі, яка зображує працездатність БПЛА.

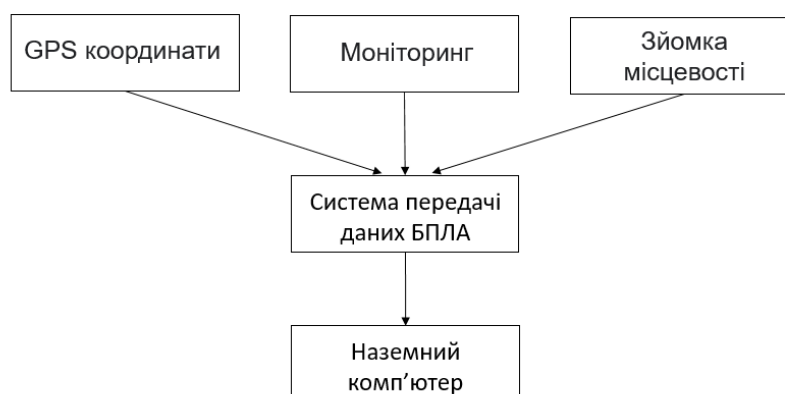


Рис.3.1.- Блок-схема потоку даних в комбінованій системі БПЛА

Вибір правильної архітектури групи БПЛА дозволить забезпечити високі рівні автономії та надійності групи, використовуючи стільникову мобільну інфраструктуру бездротового зв'язку. Розвиток групи БПЛА з автономною координаційною здатністю робить їх ще більш кориснішими в виконанні місій.

На рисунку 3.2 представлена структурна схема обладнання для традиційних комерційних застосувань.





Рис.3.2. - Структурна схема традиційного налаштування апаратного забезпечення та управління окремими БПЛА

Недоліком традиційної роботи БПЛА полягають у тому, що вони мають обмежене корисне навантаження, обмежений час польоту і вимагають від дистанційного пілота керувати ними через ручний передавач чи комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням управління. Координація роботи декількох БПЛА для виконання завдань групою є ефективнішою, оскільки вона враховує обмеження одного БПЛА, одночасно додаючи більше функціональних можливостей. Як правило, рій визначається як група поведінкових утворень, які разом координуються для отримання значного або бажаного результату [44]. Наприклад, бджоли координуються між собою для виконання завдань, критичних для виживання їхнього рою. Зграї мігруючих гусей координують ефективні схеми польоту для досягнення своєї міграції. Подібним чином, група БПЛА – це скоординована одиниця БПЛА виконує задане завдання або набір завдань [45].

Перевагою групи є економія часу, скорочення людських годин, скорочення робочої сили та зменшення інших супутніх операційних витрат. Одним із конкретних прикладів комерційного застосування, яке мало б користь від групи БПЛА, є спостереження за нормалізованим рослинним індексом. NDVI є важливим спостереженням для точного землеробства і

вимагає польоту БПЛА над сільськогосподарськими ділянками [46, 47]. Камери, обладнані обладнанням дистанційного зондування, реєструють географічні зображення з високою роздільною здатністю сільськогосподарських культур. Обладнання для зйомки та зондування NDVI показує, які частини полів сільськогосподарських культур перебувають у належній або неправильній стадії розвитку. Обстеження полів на сотні або тисячі гектарів займає дуже багато часу і не має ефективності, використовуючи сучасні методи.

Використання скоординованої групи БПЛА, що обстежують всю ділянку, майже без втручання оператора, значно підвищить ефективність та може зробити революцію в точному сільському господарстві.

Найвищий рівень автономії групи БПЛА визначається як здатність виконувати завдання, узгоджене між кількома БПЛА, без втручання оператора-людини. Цього рівня автономності може досягти група БПЛА. Група БПЛА – це кіберфізична система (CPS) [49]. Найважливішим аспектом автономії системи є ланцюжок рішень, який відбувається замість людської діяльності. Рух і виконання завдань традиційно керованого БПЛА повністю контролюється рішеннями, прийнятими людиною, тоді як у повністю автономній системі рішення приймаються за алгоритмами. Автономна CPS використовує парадигму прийняття рішень, визначену трьома стадіями: дані, контроль та процес. Структура прийняття рішень БПЛА буде слідувати цій парадигмі [49] яка представлена на рисунку 3.3.

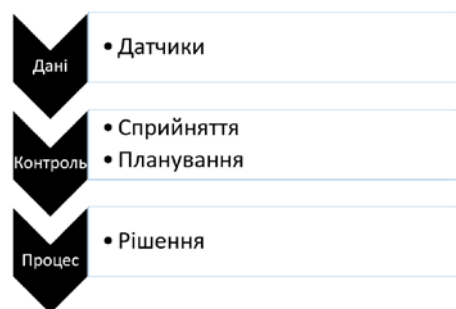


Рис.3.3. - Послідовність прийняття рішень автономної системи

Датчики – апаратне забезпечення етапу даних парадигми для групи БПЛА. Це можуть бути датчики швидкості, акустичні датчики, камери, сенсори, GPS та багато іншого залежно від місії. Вони отримують необроблені дані, які були отримані в ході виконання завдання і передають дані на комп'ютер.

Етап контролю складається з двох підфаз: сприйняття та планування. Сприйняття визначається як акт перетворення неоднозначних даних у корисну інформацію. Планування відноситься до процесу використання сприйнятої інформації для формулювання рішення щодо виконання завдання. Фази сприйняття та планування є ключовими фазами, коли необхідна розробка алгоритму і, зрештою, де реалізується автономія. Кінцевою стадією процесу є виконання прийнятих рішень та виконання завдання.

На етапі фаза сприйняття, алгоритм відіграє важливу роль в автономності літальних апаратах. Замість людської роботи управління групами БПЛА залишається за алгоритмами. Алгоритми, що керують роботою групи, заселяють стадію контролю автономної парадигми прийняття рішень. Алгоритми є важливою частиною як етапів сприйняття, так і планування етапу контролю. На цьому етапі сприйняття роль алгоритмів полягає в обробці даних, отриманих датчиками, які інформують про параметри системи. Проблеми виникають при обробці великого обсягу даних від багатьох бортових датчиків. Алгоритми в цій підфазі часто є алгоритмами видобутку даних або обробки даних, а також очищають та організовують велику кількість даних датчиків [50]. Вчені запропонували алгоритм основних компонентів ядра для виявлення аномальних даних датчиків на борту БПЛА [51]. Аналіз основних компонентів - це добре відомий метод спостереження за кореляцією між потоками даних та зменшенням розмірності даних. Використання алгоритму основних компонентів ядра для даних датчиків БПЛА є новим та помітним. Потрібно провести більше досліджень у цій галузі, але алгоритми виявлення аномалій, виявлення несправностей та зменшення розмірності повинні бути розроблені для спеціальних програм БПЛА [51].

На етапі планування алгоритми беруть оброблені дані і перетворюють їх на значущу інформацію. На етапі планування формується інформація, необхідна для виконання завдань БПЛА. Через складність систем БПЛА та дуже специфічний характер застосування БПЛА існує потреба в нових алгоритмах, які можна було б застосувати, щоб перетворити чисті дані датчиків у діючу інформацію на борту БПЛА. Деякі типи запропонованих алгоритмів - це формальна логіка [52], машинне навчання або нейронна мережа [53] та теорія графів [54-56]. Простим алгоритмом, який вже широко застосовується системами управління польотом БПЛА та GCS для навігації, є фільтр Калмана [57-58]. Запропоновано методи машинного навчання для виявлення безпечних зон посадки в аварійних ситуаціях посадки [29, 60]. Всі ці методи важливі для подальшого розвитку технології БПЛА.

Для групи БПЛА ставляться конкретні завдання, тому необхідна ретельна розробка алгоритм, бо автономне управління групи БПЛА в ефективній схемі є дуже важливим для виконання місії.

### **3.2 Архітектура спілкування групи БПЛА**

Найчастіше кожний окремий БПЛА одночасно контролюється системою управління. Групи БПЛА використовують комп'ютер як GCS із запущеним ПЗ. Комп'ютери оснащені приймачами, які передають та приймають дані телеметрії(інформація GPS, швидкість обґрунтування, параметри зібрані з датчиків) від підключених БПЛА. Трансивери використовують неліцензійні смуги радіочастот, такі як 900МГц, для передачі та прийому даних. Трансивери – це пристрій для передачі та прийому сигналів між різними системами зв'язку. Більш високий рівень автономності дозволить БПЛА приймати рішення за допомогою бортових комп'ютерів.

### 3.3 Інфраструктура архітектури групи БПЛА

Архітектура, що базується на інфраструктурі, складається з GCS, який отримує телеметричну інформацію від усіх безпілотників у групі та надсилає команди назад кожному БПЛА окремо. У деяких випадках GCS здійснює зв'язок з окремими безпілотниками в режимі реального часу, надсилаючи команди диспетчерам польоту на борту кожного БПЛА. В інших випадках льотна операція попередньо запрограмована на борту кожного БПЛА, який одночасно експлуатується, тоді як GCS просто використовується для спостереження за системами. Ці групи БПЛА вважаються напівавтономними, оскільки для виконання призначеної операції вони все ще потребують вказівок від центрального управління [61].

Архітектура групи на основі інфраструктури є найпоширенішою архітектурою для роїв БПЛА [61]. Деякі загальнозастосовані та легкодоступні програми GCS містять базові можливості групового використання на основі інфраструктури [62]. Однією з переваг групи, заснованої на інфраструктурі, є те, що оптимізація та обчислення можуть проводитися в реальному часі за допомогою GCS за допомогою більш високопродуктивного комп'ютера, який розумно може бути перенесений на БПЛА. Крім того, не потрібна взаємодія між дронами, що призводить до зменшення необхідного корисного навантаження [63, 64].

Архітектури групи на основі інфраструктури залежать від GCS для координації всіх безпілотників. Ця залежність спричиняє відсутність надмірності системи. У разі атаки або відмови від будь-якої операції GCS працездатність всієї групи порушується. Методи, засновані на інфраструктурі, вимагають, щоб усі БПЛА знаходились у межах поширення GCS. Недоліком неліцензійного радіочастотного зв'язку є те, що зв'язок може бути сприйнятливим до перешкод.

Через невелику корисну навантажувальну потужність БПЛА обладнання, необхідне для встановлення надійного зв'язку з інфраструктурою,

може обмежити корисність групи на основі інфраструктури. Іншим недоліком є відсутність розподіленого прийняття рішень. В архітектурі, заснованій на інфраструктурі, GCS координує прийняття рішень усіх БПЛА на основі обчислень та алгоритмів, розроблених в GCS. На рисунку 3.4 продемонстровано архітектуру групи на основі інфраструктури.

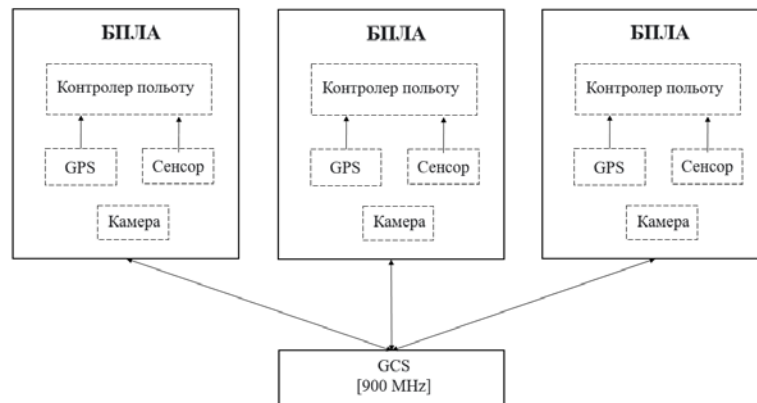


Рис.3.4. – Блок-схема інфраструктури (GCS), що базується на архітектурі групи БПЛА

У роботі [64] пропонується використання FANET для координації зв'язку між усіма дронами в мережі. FANET - це група БПЛА, що взаємодіють між собою, не потребуючи точки доступу, але принаймні один з них повинен бути підключений до наземної бази або супутника. БПЛА виконують свої місії без допомоги людини, як автопілот. В останні роки багато дослідницьких галузей наукових кіл та промисловості було зосереджено на FANET завдяки дешевшим та меншим бездротовим комунікаційним пристроям. Зараз FANET використовуються в різних додатках, таких як військові та цивільні програми, управління пожежами та моніторинг катастроф. Оскільки кожен тип мережі має свої власні технічні характеристики, важливо використовувати надійний протокол, заснований на специфікаціях, і перевіряти його ефективність за допомогою моделювання. Два фактори впливають на моделювання

протоколів: перший - це модель мобільності, а другий - це модель комунікації трафіку, серед інших.

Бездротова спеціальна мережа - це бездротова мережа, яка не покладається на існуючу інфраструктуру для встановлення мережі. Для спеціальної мережі не потрібні маршрутизатори або точки доступу. Натомість вузли динамічно призначаються та перепризначаються на основі алгоритмів динамічної маршрутизації. Різні конфігурації спеціальних комунікаційних мереж були запропоновані в системах зв'язку M2M [65-70]. У FANET всі БПЛА є частиною мережі зв'язку, яка встановлена між БЛА. Ця мережа дозволяє здійснювати зв'язок у режимі реального часу між БПЛА, як показано на рисунку 3.5.

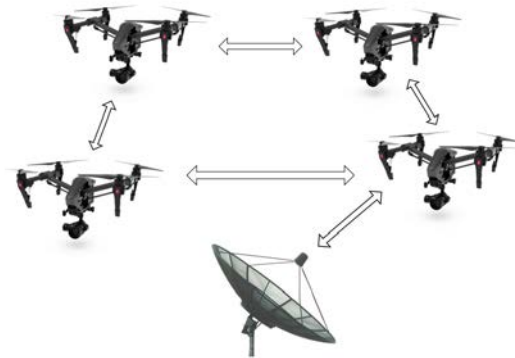


Рис.3.5. – Архітектура зв'язку групи БПЛА на базі FANET

Прямий зв'язок між БПЛА змушує розподіляти рішення, оскільки це не є необхідністю для механізму прийняття рішень на основі інфраструктури. Це також забезпечує вбудовану надмірність, оскільки весь рій не залежить від інфраструктури для виконання бажаної операції. Це головна перевага FANET. Деякі недоліки FANET пов'язані з міркуваннями розміру, ваги та потужності.

Для встановлення FANET на борту кожного БПЛА потрібно мережеве обладнання. Відстань, на якій БПЛА можуть надійно спілкуватися між собою в FANET, є обмежуючим фактором для його реалізації [71, 72]. Динамічна реконфігурація маршруту для ройових додатків БПЛА є складним завданням,

що призводить до втрати пакетів [71, 73]. Для застосувань, де точна телеметрія даних між БПЛА є критичною, встановлення надійного FANET є складним [71, 72]. Ця робота пропонує гібрид інфраструктурної мережі, що використовує стільникову інфраструктуру бездротового зв'язку, але встановлює мережевий протокол між безпілотниками без втручання GCS. Ця запропонована архітектура роїв БЛА використовує переваги обох архітектур, одночасно пом'якшуючи деякі слабкі місця.

Для того, щоб покращити дану архітектуру адаптуємо її спеціальною мережею, реалізованою за допомогою підтримки інфраструктури. Така інфраструктура має повний зв'язок БПЛА-БПЛА, де телеметрія кожного БПЛА передається кожному другому БПЛА через стільникову мобільну інфраструктуру, яка представлена на рисунку 3.6. В такій архітектурі рішення розподіляється між БПЛА, а інфраструктура чисто використовується для передачі даних.

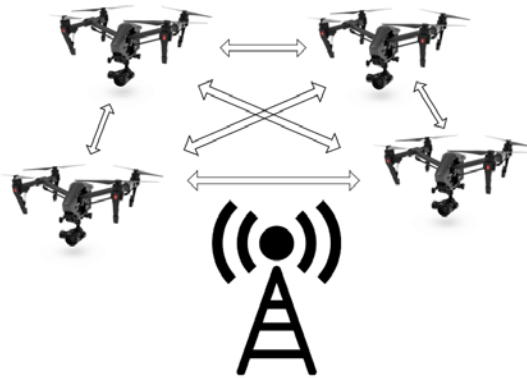


Рис. 3.6. – Архітектура БПЛА стільникової мережі

Командування та управління одним БПЛА за допомогою інфраструктури стільникової мережі було запропоновано в АТТ [74] та Qualcomm [75], а технології передачі даних камер для БПЛА через стільникові мережі продемонстровано Botlink [76].



## **4 РОЗРОБКА МЕТОДУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ ТРАКТОРІЇ ГРУПИ БПЛА ПРИ ВИРІШЕНІ ЗАДАЧ ЗЙОМКИ МІСЦЕВОСТІ**

### **4.1 Особливості використання БПЛА в сільському господарстві та їх переваги**

Екологічний моніторинг - це процес цілеспрямованого збору інформації для відстеження та допомоги зрозуміти зміни в структурі екосистеми, екологічних процесах та екологічній послугі, які екосистеми надають природі, включаючи людину. Моніторинг дозволяє нам відстежувати зміни в навколишньому середовищі і побачити, як дії людини - як позитивні, так і негативні - можуть зіграти роль у впливі на навколишнє середовище. [41, 42].

Щоб мати ефективний процес моніторингу, необхідно мати сучасне обладнання та технології, системи моніторингу, системи збору та обробки даних. Особливо важливо мати системи, що працюють з даними дистанційного зондування, які на сьогоднішній день є найбільш швидкими у використанні. Зображення сільського господарства повинні мати викосу тимчасову роздільну здатність, а дані супутникових знімків та дані отримані з керованого літака отримати досить складно і вони не доступні для більшості. З розвитком технологій БПЛА це стало робити легше, тому вони стали об'єктом багатьох досліджень. За допомогою GPS, вимірювальних датчиків та технік навігація БПЛА є автономною, автопілот забезпечує швидке і якісне картографування потрібних областей.

Використання БПЛА в сільському господарстві має великі перспективи в майбутньому.

Основні завдання моніторингу сільського господарства БПЛА:

- Виявлення засаджених земель та спостереження за врожаєм;
- Оцінка стану та прогнозування врожаю;
- Виявлення зараженості врожаєм та оцінка ґрунту;

- Оцінка врожаю, пошкоджених природними явищами (дощ, град, засуха);

За останні роки БПЛА мають особливе значення в сільському господарстві завдяки точному землеробству – це тип управління полями, який завдяки новітнім технологіям та обладнанням з GPS дозволяє ідентифікувати, аналізувати та швидко реагувати на різні характеристики земельних ділянок та застосовувати найбільш підходящу систему землеробства (наприклад, обробка землі, вибір сортів тощо). В світі визнано, що точне землеробство або «точний підхід», що означає правильні дії в потрібному місці і в потрібний час, пришвидшує всебічний розвиток сільського господарства (рис.4.1).

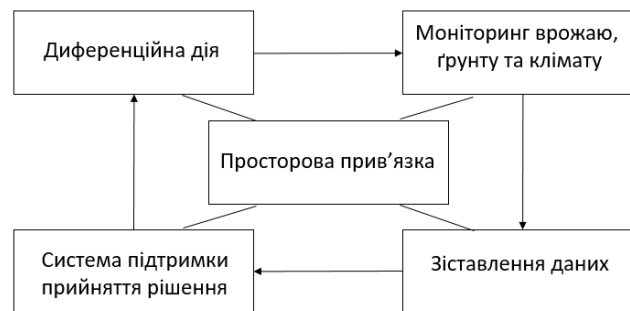


Рис.4.1. - Процес точного землеробства

Підключення БПЛА в сільське господарство має зростаючу тенденцію і забезпечує точне управління врожаєм, яке може заощадити фермерам багато часу та ресурсів.

Одним з найдешевших і найбільш перспективних видів моніторингу сільськогосподарських земель є використання БПЛА. Невеликі дрони мають ряд переваг перед традиційними системами аерофотозйомки і супутниками. Фотографії, зроблені за допомогою БПЛА, доступні за запитом і забезпечують повне просторове покриття без перешкод з боку хмар. Ці безпілотні системи можуть забезпечити дуже високий дозвіл зображення: до 2 см при необхідності. У порівнянні з супутниками, БПЛА не мають мінімальних обмежень по площі для зйомки. Різниця між керованим пілотом літаком і

БПЛА полягає в тому, що політ БПЛА займає набагато менше часу через маневреності, а його вміння може забезпечити отримання високоякісного зображення в важкодоступних місцях.

Основні переваги використання безпілотних авіаційних систем:

- доступність (використання системи дешевше, ніж інші альтернативи);
- Гнучкість (простота використання, можливість зміни налаштувань і цілей місії в будь-який час, швидка передача даних);
- Ефективність (може виконувати різні види місій з меншими ресурсами і може забезпечити високу якість вихідних даних).

Моніторинг сільськогосподарських угідь за допомогою БПЛА – це система, що складається з декількох етапів. Ці етапи можна розділити на дві групи, які зображені на рисунку 4.2.



Рис.4.2. – Збір зображень БПЛА

Використання БПЛА для сільськогосподарського моніторингу має свої можливості: швидке та просте проектування місії, економічності, повторне використання, можливість швидко переналаштувати змінивши параметри для іншої місії, моніторинг великих територій та ефективне спостереження. БПЛА, обладнане автопілотом та заздалегіть спланованим маршрутом може робити фотографії з повітря через запланований інтервал часу.

## 4.2 Розробка алгоритму та побудова траєкторії групи БПЛА

Алгоритм планування повинен забезпечувати здійсненні та функціональні оптимальні траєкторії, що зв'язуються, починаючи з цільових точок, які слід порівнювати та оцінювати за допомогою конкретних критеріїв.

Ці критерії, як правило, пов'язані з наступними основними проблемами, які виникають під час процедури формування плану: доцільність та оптимальність. Перший концерн просить скласти план безпечного «переміщення» БПЛА до цільового стану без урахування якості складеного плану. Друга проблема стосується вироблення оптимальних, але здійснених шляхів з оптимальністю, визначеною різними способами відповідно до розглянутої проблеми. Навіть у простих задачах пошук оптимальності не є тривіальним завданням і в більшості випадків призводить до надмірного часу обчислень, не завжди доступного в реальних додатках. Тому в більшості випадків ми шукаємо неоптимальні або просто здійсненні рішення.

Найпростіший спосіб моделювання шляху БПЛА - це використання прямолінійних відрізків, які з'єднують безліч шляхових точок у двовимірному або тривимірному просторі. Цей підхід враховує той факт, що в типових місцях БПЛА найкоротші шляхи мають тенденцію нагадувати прямі лінії, які з'єднують пункти маршруту з початковою і цільовою точками та вершинами багатокутних перешкод. Незважаючи на те, що шляхові точки можна ефективно використовувати для навігації по транспортному засобу, прямолінійні відрізки, що з'єднують відповідні шляхові точки, не можуть ефективно представляти реальний шлях, яким буде рухатися транспортний засіб через власну кінематику простеженого шляху. Як результат, ці спрощені шляхи не можуть бути використані для точного моделювання руху БПЛА в процедурі оптимізації, якщо не прийнято велику кількість шляхових точок. У цьому випадку кількість змінних проектування в процедурі оптимізації вибухає разом із часом обчислення.

Планування польотів також повинні враховувати обмеження апаратного забезпечення безпілотників. Додавання складності процесу побудови правильного шляху також зменшує продуктивність алгоритмів, що використовуються для їх попередньої побудови. Швидкість, з якою ці польоти можуть бути сплановані та переплановані із змінами даних про погоду та рельєф місцевості та оновлення батареї та апаратного забезпечення

безпілотної, стає вирішальною. Є два основних типи: звичайні безпілотні літальні апарати, які виконують звичайний зліт і посадку, і квадрокоптери з вертикальним злетом і посадкою. Поряд із проблемою, з якою стикаються при побудові швидких шляхів для безпілотників, що оптимізують використання цих різних типів безпілотників для покриття цілого регіону, масштабування побудови поточного шляху має залишатися ефективним з додатковими обмеженнями на типи безпілотників. Кожен тип безпілотної страждає від конкретних обмежень та вартості експлуатації різних типів безпілотної також може суттєво відрізнятися. Ці обмеження та витрати також суттєво змінюються протягом певного періоду завдяки вдосконаленню апаратного забезпечення акумулятора та дронів.

Тоді проблема оптимізації стає багатогранною: не тільки потрібно охопити весь регіон кількома прицілами типу безпілотної, який може керувати на різній місцевості, але безпілотники, які дешевші в експлуатації, повинні використовуватися якомога частіше щоб мінімізувати витрати, і весь процес повинен бути швидко повторюваним завдяки оновленням акумуляторів та апаратів безпілотної, додаючи рельєфу завдання і зміни погодних умов. Розподілена обробка більших загальних площ, як правило, поділяється на менші ділянки або субрегіони. Робити це інтерактивно з розподілом на основі пам'яті зменшує час оператора. Охоплення дуже великих територій за допомогою безлічі безпілотної літальних апаратів, кожен зі своїм власним певним шляхом, створює низку проблем, однак:

- Обробка місцевості та даних мережі в пам'яті. Дані про місцевість включають геокоординати, висоту, вологість тощо та потребують обробки на кластері. Обробка їх у пам'яті і, таким чином, мінімізація доступу до диска має вирішальне значення для хорошої роботи.
- Розподілене обчислення світлових шляхів. Ефективні розрахунки планів руху за короткий проміжок часу дозволяють швидко здійснити обертання після внесення коригувань. Ефективне складання наземних

шляхів також дозволяє подавати їх у кожен безпілотник вручну та регулювати, якщо обсяг роботи змінюється.

- Оптимізація для різних типів дронів. Оптимізація обмеження для різних типів безпілотників. Зосередження на найефективнішому використанні безпілотника на основі експлуатаційних витрат, обмежень кожного типу безпілотника та інших обмежень.

Потрібно врахувати такі фактори місцевості, як довжина ліній електропередач та висота, щоб оптимально поділити територію на субрегіони, а потім побудувати план руху для кожного субрегіону. Враховуючи декілька факторів призначається найбільш відповідні типи безпілотників для цього субрегіону. Знання щодо мережевих ліній та висоти маршрутних точок у кожному субрегіоні необхідні для правил, що регулюють обмеження автономії та кута підйому. Ці обмеження визначають, чи потрібно субрегіон зменшувати, розширювати чи розподіляти між різними типами безпілотників.

Характеристиками кожного типу безпілотника є такі характеристики, як його швидкість, автономність, радіус повороту та максимальний нахил. Щоб забезпечити обробку безлічі типів безпілотників, ці характеристики можна конфігурувати, і компанія, що працює над безпілотниками, може легко їх регулювати за допомогою конфігураційних файлів.

Основними обмеженнями апаратного забезпечення безпілотника є:

- Кількість шляхових точок. Апаратне забезпечення звичайних безпілотників можна запрограмувати до 200 шляхових точок, тоді як квадрокоптер можна запрограмувати лише на 50 шляхових точок.
- Кут сходження. Максимальний нахил підйому для звичайного безпілотника становить  $12^\circ$ ; для спуску це -  $16^\circ$ . Для квадрокоптера максимальний нахил для підйому становить  $90^\circ$ , а для спуску -  $90^\circ$ .
- Максимальна відстань автономності звичайного безпілотника за один пристрій становить 30 км, а для квадрокоптера - 3 км. Такі обмеження на шляху руху різних типів дронів моделюються як нерівності.

Нерівності застосовуються до кожного субрегіону для різних типів безпілотників і визначаються наступним чином.

Відомо, що для кута підйому (4.1):

$$\text{Max}(c_p) \leq C_{type} \quad (4.1)$$

де  $C_p$  - кут, на який дрон повинен піднятися в напрямку від однієї до другої точки маршруту вздовж лінії мережі, і розраховується на основі рекомендованої висоти польоту безпілотника та висоти в точках маршруту. Рекомендована висота для звичайних безпілотників - 100 м, а для квадрокоптерів - 50 м. Максимальна вага безпілотника може становити 220г. Для маршрутних точок вздовж сторін ліній мережі висоту обчислюють шляхом запиту  $k$  найближчих точок висоти із запитом просторового індексу  $kNN$  та беручи їх середнє значення, забезпечуючи тим самим, що воно задовольняє обмеженню кута сходження.

Для автономності (4.2):

$$\sum_l (2 * d_l + i_l) + 3 * l * 2 * \pi * r + t + n + e_{type} \leq A_{type} \quad (4.2)$$

де  $d$  - відстань уздовж кожної лінії мережі,  $t$  - відстань взяття, щоб досягти необхідної висоти над першим полюсом мережі для кута підйому кожного типу безпілотника,  $n$  - відстань посадки для кута спуску для цього типу безпілотника,  $i$  - відстань між двома мережевими лініями,  $r$  - відстань повороту для типу безпілотника для  $l$  ліній, а  $A_{type}$  - відстань, додана до буфера проти непередбачених умов, з якими стикається дрон. Радіус повороту звичайного безпілотника становить 150 мкм, а квадрокоптера - 0 мкм. Відстань  $i$  обчислюється шляхом упорядкування мережеских ліній у субрегіоні на основі їх  $x_{start}$ , а потім обчислення відстані між одним рядком та наступним.

Алгоритм побудови базових планів, який виконує запити та застосовує обмеження на результати в межах субрегіону. В місії групи БПЛА використовується  $(x, y)$  геокоординатні позиції кінцевих точок ліній мережі, що надаються авіаційною організацією, що вводить в експлуатацію, і дані висоти  $(x, y, \text{висота})$ , надані географічним агентством. БПЛА під час місії

повинні тримати висоту в бм над рівнем землі. Алгоритм автономного польоту БПЛА представлений на рисунку 4.3.

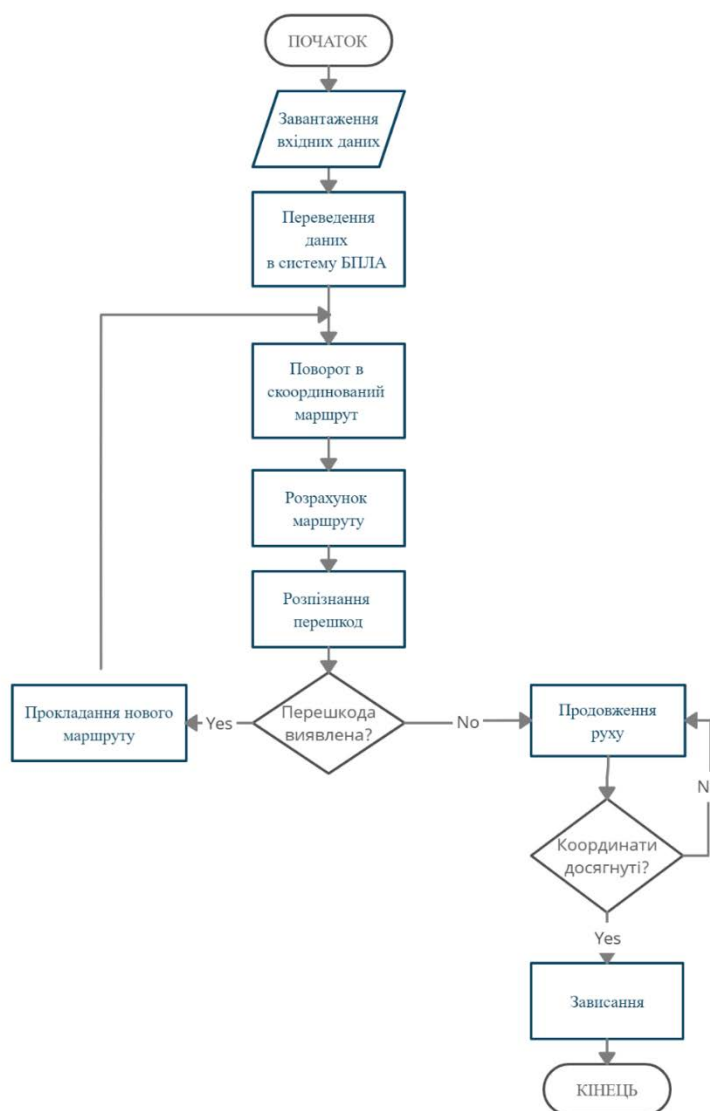


Рис.4.3. – Алгоритм автономного польоту БПЛА

Перед місією в систему БПЛА завантажуються вхідні дані, де вбудовані координати і швидкість польоту. Далі БПЛА визначає напрям і здійснює поворот. Запускається процес виявлення перешкод і у разі їх виявлення виконується побудова нового, обхідного маршруту. В кінці маршруту виконується перевірка кінця координат, і якщо вони присутні, продовжується політ по заданій траєкторії. У разі відсутності координат – виконується завершення маршруту і БПЛА включає режим зависання.



Також, вхідні дані складаються з набору параметрів, до якого входить набір шляхових точок (x, y, висота над рівнем землі) і однієї точки посадки, які подаються безпосередньо в БПЛА.

Для прикладу, побудовано план місії для групи БПЛА по польоту заданого субрегіону, який зображений на рисунку 4.4. Даний регіон розділений на 4 частини для мінімізації польоту окремих БПЛА, що значно зменшує час і ресурси на місію.

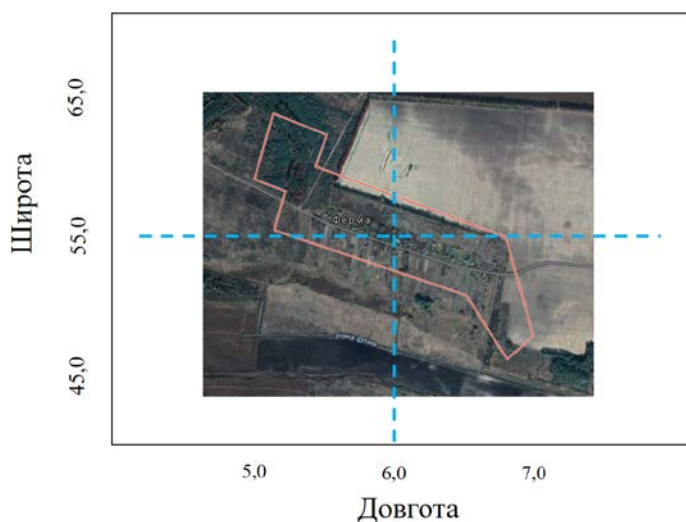


Рис.4.4. – Загальний регіон, розділений на 4 частини

У разі, коли регіон займає велику територію його можна розділити ще на декілька частин для більш ефективної побудови траєкторії групи БПЛА. На рисунку 4.5 зображено загальний регіон, який розділено на 36 частин.

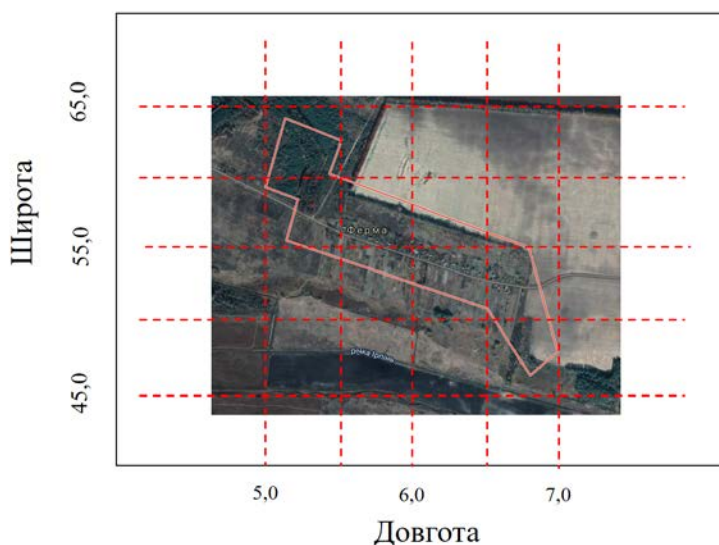


Рис.4.5. – Загальний регіон, розділений на 36 частини

Після того як траєкторію маршруту групи БПЛА прокладено і налаштовані всі вхідні дані, розпочинається місія (рис. 4.6). Кількість маршрутів залежить від характеру місії та масштабності території.

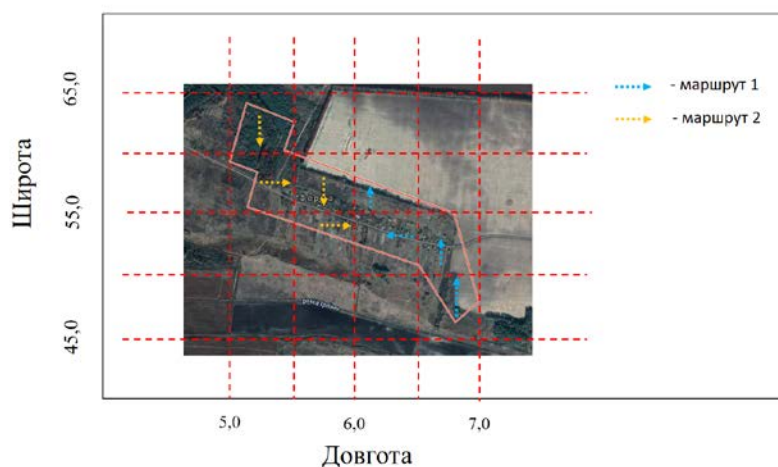


Рис.4.6. – Загальний регіон з прокладеними маршрутами БПЛА

Для кожного субрегіону пишеться вихідний файл, що містить плановий план по місії. БЛПА може бути одного з декількох типів і відрізнятися по характеристикам такі, як його швидкість, автономність, радіус повороту та максимальний нахил. Характеристики можна конфігурувати, і компанія, що працює над безпілотниками, може легко їх налаштувати за допомогою конфігураційних файлів.

Під час місії кожен полюс, що входить в мережу, повинен бути сфотографований мінімум 4 рази. Група БПЛА виконує 2 проходи з кожного боку ліній, причому перший прохід в одному напрямку, а зворотний - в інший. Це дозволить захватити більшу частину територію і підвищить ефективність зйомки регіону.

### 4.3 Розробка математичної моделі побудови траєкторії групи БПЛА

Планування траєкторії і планування руху є синонімами, але їх не слід плутати з планування шляху, яке не обмежене часом.

Серед алгоритмів планування можна виділити два класи:

- Розглядається лише планування шляху. Це створення геометричної функції, за якою буде розвиватися безпілотник, де проблемою постає часова залежність.
- Розглядається планування руху. Це створення обмеженої у часі траєкторії.

Поведінкові методи – це локальні алгоритми планування руху, засновані на простих правилах, які застосовуються до поодиноких частинок на основі інформації, що надходить з єдиного сусідства. Вони легко формулюються і досить ефективні в масштабуванні.

В група кожен БПЛА, що розвивається на площині, представлений відповідною позицією  $x_i$ . Швидкість дії БПЛА  $v_i$  мають постійну форму – рівномірну серед групи абсолютне значення та орієнтацію  $\Theta_i$ . На початковому етапі положення та орієнтація розподіляються хаотично. Час дискретизується з дискретним приростом  $\Delta t$ , а потім положення кожного БПЛА оновлюється на кожному етапі часу  $t_j$  представлено в формулі 4.3.

$$x_i(t_{j+1}) = x_i(t_j) + v_i(t_j)\Delta t, \quad (4.3)$$

а кут повороту вектора швидкості  $i$ -безпілотника оновлюється як представлено на формулі 4.4.

$$\theta_i(t_{j+1}) = \langle \theta_i(t_j) \rangle_r + \Delta\theta, \quad (4.4)$$

де  $\langle . \rangle$  зростає середнє за колом радіуса  $r$ , включаючи і частинку

$\Delta\theta$  – рівномірний шум при  $\Delta\theta < \eta/2$

Метою цих двох формул є отримання поведінки групи, які будуть вирівнюватися на початку руху.

Простий аналіз граничних випадків показує, що при низькій швидкості –  $v \rightarrow 0$  частинки не рухаються і, як наслідок, система не еволюціонує. На високій швидкості –  $v \rightarrow \infty$  – система повністю змішується між двома оновленнями. При низькій щільності та високому шумі, БПЛА збираються в невеликі групи, що рухаються у випадкових напрямках. При високій щільності та низькому рівні шуму виникає групування, тобто вирівнювання БПЛА в унікальну групу. Таку поведінку можна пояснити як аналогія фазовим переходам певних фізичних систем.

Добавивши в формулу 4.4 графічне матричне представлення. Замість оновлення кута повороту на основі геометричного сусідства, можна оновити його на основі сусідства мережі кожного БПЛА. Оновлення вектора кута повороту представлено в формулі 4.5.

$$\theta(t_{j+1}) = F_{\sigma(t_j)} \theta(t_j), \quad (4.5)$$

де  $\theta$  – вектор, що містить кути повороту всіх агентів,  $F_p = (I + D_p)^{-1}(I + A_p)$ , з  $D_p$  діагональною матрицею,  $j$  діагональний елемент якої валентність вершини  $j$ , а граф  $A_p$  матриця суміжності  $p$ .

Застосування  $\sigma$  обрано у відповідно визначеній підмножині набору простих графіків на  $n$  вершинах. Вибираючи відповідний комутаційний сигнал  $\sigma$  не обов'язково виходячи із геометричного положення БПЛА, де доводиться збіжність БПЛА, що представлено в формулі 4.6.

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \theta(t_j) = \theta_{ss} 1, \quad (4.6)$$

де  $1$  – вектор із усіма координатами, рівними  $1$ , а  $\theta_{ss}$  залежить лише від  $\theta(0)$  та  $\sigma$ . На основі цієї формули пропонується контролер зворотнього зв'язку  $u(t)$ , який представлено в формулі 4.7.

$$u(t) = G_{\sigma(t)}^{-1} L_{\sigma(t)} \theta(t), \quad (4.7)$$

де  $L_r$  – лапласівська матриця графів та  $G_r$  відповідно визначена, не особо виражена діагональна матриця.  $L_{\sigma(t)} \theta(t) = e(t)$  може розглядатися як середня помилка курсу. Вибравши належним чином матрицю  $G$  можна керувати системою до будь-якого бажаного кута – формула 4.8,

$$\theta(t_{j+1}) = \theta(t_j) + u(t), \quad (4.8)$$

Потім за допомогою цього контролера з відкритим циклом та попередніх результатів вводиться модель послідовного лідера(віртуального). Цей лідер рухається з постійною швидкістю з постійною орієнтацією і за певних припущень всі БПЛА будуть узгоджуватися з лідером. Результат доводиться справедливим і у неперервному випадку для моделі безперервного часу  $\theta = u$ .

Цей метод можна застосовувати в військовій сфері на БПЛА що рухаються. Вони можуть рухатися в 4-х різних формуваннях: алмазноподібні, клинкоподібні, лінійні чи колоноподібні. Передбачається, що різні БПЛА слідкуватимуть за командиром взводу або за центром формування. Метод базується на спільних знаннях та регулярному обміні GPS-даними.

Тепер БПЛА потрібно досягнути  $M$  реперних точок, тому затрати на енергоресурси зіставляють(рис.4.9):

$$R = (k_1 + k_2) * (M + 1) + k_3 * M + k_4 * L + k_5 \quad (4.9)$$

$k_1$ – затрати енергоресурсів на набір потрібної висоти;  $k_2$ – затрати енергоресурсів на початок руху і набору швидкості;  $k_3$ – затрати енергоресурсів на знімок;  $k_4$ – затрати енергоресурсів на маршрут з постійною швидкістю;  $L$  – пройдена відстань з постійною швидкістю;  $k_5$  – затрати енергоресурсів на посадку в заданій точці

Відстань  $L$  розраховується:

$$L = \sum_{k=0}^M \sqrt{(X_M + X_{M+1})^2 + (Y_M - Y_{M+1})^2} - (M + 1) * (L_r + L_s) \quad (4.10)$$

де  $(X_0; Y_0)$  та  $(X_{M+1}; Y_{M+1})$  – координати стартової точки з якої стартує і в яку повертається БПЛА групи;  $L_r$  та  $L_s$  – відстань яку пройшов БПЛА під час набору швидкості та зупинки в реперній точці.

Необхідна кількість енергоресурсів повинна задовольняти умову:

$$R < R_b \quad (4.11)$$

де  $R$  – затрати на енергоресурси(4.9),  $R_b$  – запаси енергоресурсів на борту БПЛА. Якщо дана умова не виконана, то БПЛА не матиме змоги довести поставлену місію до кінця.

Для мінімізації затрати часу на зйомку в заданій точці введемо для кожної зони поняття цінності:

$$a_k = \frac{1}{L_k} \quad (4.12)$$

де  $L_k$  – відстань між стартовою точкою, з якої стартує група, та центр  $K$ -зони.

Нехай  $CP_i(t)$  – багато реперних точок, перевіреними  $i$ -м БПЛА до моменту часу  $t$ , що задовольняє умовам:

$$\begin{aligned} CP_i(t) &= \emptyset, \text{ при } t < t_{i,min} \\ CP_i(t) &\subset P_i, \text{ при } t_{i,min} < t < t_{i,max} \\ CP_i(t) &= P_i, \text{ при } t > t_{i,max} \end{aligned}$$

де  $t_{i,min}$  – час, необхідний  $i$ -му БПЛА щоб дібратися до своєї першої реперної точки;  $t_{i,max}$  – час, необхідний  $i$ -му БПЛА щоб побувати у всіх реперних точках;  $P_i$  – множина реперних точок.

Для всієї групи накопичена цінність складе:

$$A(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \quad (4.13)$$

де  $N$  – кількість БПЛА в групі.

Для максимізації накопичуваної цінності кожен БПЛА використовує функцію прийняття:

$$f_1(t, i, j) = \sum_{k=1}^{|CP_i(t) \cup j|} a_k \rightarrow \max \quad (4.14)$$

де  $i$  – номер БПЛА, що робить вибір;  $j$  – реперна точка доступна для вибору. Такі реперні точки будуть називатися потенціальними. Але, набагато ефективніше використовувати функцію прийнятності не на основі цінностей, а на основі відстані:

$$f_1(t, i, j) = \frac{1}{\sqrt{(X_{i,j} - X_j)^2 + (Y_{i,j} - Y_j)^2}} \rightarrow \max \quad (4.15)$$

де  $(X_{i,j}; Y_{i,j})$  – координати останньої реперної точки  $i$ -го БПЛА;  $(X_j; Y_j)$  – координати потенційної  $j$ -ї реперної точки. На рисунку 4.7 представлено графік наростання сумарної цінності (4.13) при використанні функції прийнятності (4.14) і (4.15).



Рис. 4.7. – Наростання цінностей при використанні функції (4.14) і (4.15)

З графіка видно, що при використанні функції прийняття (4.15) час роботи групи менший ніж при використанні функції (4.14). Таким, чином це дозволить нам зменшити затрату часу на подолання відстані. Однак, використовуючи цю функцію є ризик несвоєчасно замітити об'єкт, але на зйомку місцевості це не впливає через дослідницький характер місії, а не пошук об'єктів.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи всі поставлені завдання було виконано в повному обсязі. Розроблено автоматизований метод побудови траєкторії групи БПЛА для вирішення задач зйомки місцевості.

В роботі виконано аналіз існуючих методів, алгоритмів побудови маршруту БПЛА в різних середовищах та в різних сферах діяльності, виявлено їх недоліки та переваги.

Було розглянуто сучасні вимоги та методики побудови траєкторії БПЛА. Представлений алгоритм автономного польоту БПЛА по заданій траєкторії для зйомки місцевості, послідовність прийняття рішення автономним БПЛА, інфраструктура та архітектура групи БПЛА.

Розроблений метод можна використовувати в сільському господарстві, в військовій сфері для автоматизованої побудови траєкторії для виконання задач зйомки місцевості.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Beб Hexmoor, Henry & Mclaughlan, Brian & Baker, Matt. (2005). Swarm Control in Unmanned Aerial Vehicles. 2. 911-917.
2. Ryan, Allison & Zennaro, Marco & Howell, A. & Sengupta, R. & Hedrick, J.K.. (2005). An overview of emerging results in cooperative UAV control. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 1. 602 - 607 Vol.1. 10.1109/CDC.2004.1428700.
3. Gupta, Lav & Jain, Raj & Vaszkun, Gabor. (2015). Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 18. 1-1. 10.1109/COMST.2015.2495297.
4. Hu, Yujiao & Yao, Yuan & Ren, Qian & Zhou, Xingshe. (2019). 3D multi-UAV cooperative velocity-aware motion planning. Future Generation Computer Systems. 102. 10.1016/j.future.2019.09.030.
5. Shorakaei, Hamed & Vahdani, Mojtaba & Imani, Babak & Gholami, Ali. (2014). Optimal cooperative path planning of unmanned aerial vehicles by a parallel genetic algorithm. Robotica. 10.1017/S0263574714001878.
6. Gottlieb, Yoav & Shima, Tal. (2015). UAVs Task and Motion Planning in the Presence of Obstacles and Prioritized Targets. Sensors. 15. 29734-29764. 10.3390/s151129734.
7. Vardhan, Yash & Abbas, Houssam & Quaye, Rhudii & Mangharam, Rahul. (2018). Fly-by-Logic: Control of Multi-Drone Fleets with Temporal Logic Objectives. 10.1109/ICCP.2018.00026.
8. Zhai, Weixin & Tong, Xiaochong & Miao, Shuangxi & Cheng, Cherry & Ren, Fuhu. (2019). Collision Detection for UAVs Based on GeoSOT-3D Grids. ISPRS International Journal of Geo-Information. 8. 299. 10.3390/ijgi8070299.
9. Tahir, Anam & Böling, Jari & Haghbayan, Mohammad-Hashem & Toivonen, Hannu & Plosila, Juha. (2019). Swarms of Unmanned Aerial Vehicles – A Survey. Journal of Industrial Information Integration. 16 (100106). 10.1016/j.jii.2019.100106.
10. Rovira, Arnau & Razi, Abolfazl. (2017). Predictive routing for dynamic UAV networks. 43-47. 10.1109/WiSEE.2017.8124890.
11. Ashraf, Adnan & Majd, Amin & Troubitsyna, Elena. (2020). Online Path Generation and Navigation for Swarms of UAVs. Scientific Programming. 2020. 1-14. 10.1155/2020/8530763.
12. Wubben, Jamie & Aznar, Pablo & Fabra, Francisco & Calafate, Carlos & Cano, Juan-Carlos & Manzoni, Pietro. (2020). Toward secure, efficient, and seamless reconfiguration of UAV swarm formations.
13. Srivastava, Divya & Pakkar, Roxanna & Langrehr, Austin & Yamane, Chaska. (2019). Adaptable UAV Swarm Autonomy and Formation Platform. 1-6. 10.1109/AERO.2019.8741683.
14. Kussyk, Janusz & Uyar, M. & Ma, Kelvin & Samoylov, Eltan & Valdez, Ricardo & Plishka, Joseph & Hoque, Sagor & Bertoli, Giorgio & Boksiner, Jeffrey.

(2020). Artificial intelligence and game theory controlled autonomous UAV swarms. *Evolutionary Intelligence*. 10.1007/s12065-020-00456-y.

15. Yue, Longwang & Chen, Hanning. (2019). Unmanned vehicle path planning using a novel ant colony algorithm. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2019. 10.1186/s13638-019-1474-5.

16. Garapati, Kala & Roldán Gómez, Juan & Garzon, Mario & Cerro, Jaime & Barrientos, Antonio. (2018). A Game of Drones: Game Theoretic Approaches for Multi-robot Task Allocation in Security Missions. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 855-866. 10.1007/978-3-319-70833-1\_69.

17. Shakhathreh, Hazim & Khreishah, Abdallah & Chakareski, Jacob & Bany Salameh, Haythem & Khalil, Issa. (2017). On The Continuous Coverage Problem for a Swarm of UAVs. 10.1109/SARNOF.2016.7846742.

18. Sampedro Pérez, Carlos & Bavle, Hriday & Sanchez-Lopez, Jose & Suarez Fernandez, Ramon & Rodríguez Ramos, Alejandro & Molina, Martin & Campoy, Pascual. (2016). A flexible and dynamic mission planning architecture for UAV swarm coordination. 355-363. 10.1109/ICUAS.2016.7502669.

19. WANG, Lizhi & ZHAO, Xuejiao & Zhang, Yuan & WANG, Xiaohong & MA, Tielin & GAO, Xia. (2020). Unmanned aerial vehicle swarm mission reliability modeling and evaluation method oriented to systematic and networked mission. *Chinese Journal of Aeronautics*. 10.1016/j.cja.2020.02.026.

20. Chen, Xi & Tang, Jun & Lao, Songyang. (2020). Review of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Communication Architectures and Routing Protocols. *Applied Sciences*. 10. 3661. 10.3390/app10103661.

21. Моделирование групповых полетов беспилотных летательных аппаратов методом теории графов Д.И. Бондарев, Д.П. Кучеров, Т.Ф. Шмелева

22. О.І. Тимочко, Д.Ю. Голубничий, В.Ф. Третьяк, І.В. Рубан Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

23. FAA Draft Advisory Circular, Unmanned Air Vehicle Design Criteria, Section 6.j, 15 July 1994.

24. Unmanned Aerial Vehicle Operations in U.K. Airspace – Guidance, CAP 722, Section 2.1, Directorate of Airspace Policy, Civil Aviation Authority, 2002.

25. ICAO, ICAO Circular 328, Unmanned Aircraft Systems (UAS), Technical Report, International Civil Aviation Authority. Montreal, Canada, 2011.

26. Веб застосунок [Електронний ресурс]. – Точка доступу: URL: <http://www.pobonline.com/articles/96996-how-can-drones-transform-surveying> – Веб застосунок

27. J. Everaerts, NEWPLATFORMS – Unconventional Platforms (Unmanned Aircraft Systems) for Remote Sensing, Technical Report 56, 2009, European Spatial Data Research (EuroSDR).

28. H. Eisenbeiss, UAV Photogrammetry, Ph.D. Thesis, Institut für Geodesie und Photogrammetrie, ETH-Zürich, Zürich, Switzerland, 2009.

29. P. Van Blyenburgh, RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective 2013/2014, Technical Report, UVS International, Paris, France, 2013.

30. K. Kim, J. Davidson, Unmanned Aircraft Systems Used for Disaster Management, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2015, University of Hawaii.
31. K. Kim, J. Davidson, Unmanned Aircraft Systems Used for Disaster Management, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2015, University of Hawaii.
32. ISO/AWI 21895, Categorization and classification of civil unmanned aircraft systems
33. ISO/TC 20/SC 16/WG 2, Unmanned Aircraft Systems -- Part 2: Product systems.
34. ISO/TC 20/SC 16/WG 3, Unmanned Aircraft Systems -- Part 3: Operational procedures.
35. ISO/TC 20/SC 16/WG 1, Unmanned Aircraft Systems -- Part 1: General specification.
36. Mitka, Eleftheria & Mouroutsos, Spyros. (2017). Classification of Drones. American Journal of Engineering research. 6. 36-41.
37. Адаптивна система управління беспилотним летательним апаратом Т-10» 2008 г.
38. О.І. Тимочко, Д.Ю. Голубничий, В.Ф. Третьяк, І.В. Рубан Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків.
39. Веб застосунок [Електронний ресурс]. – Точка доступу: URL: <http://www.alecmomont.com/projects/dronesforgood> – Веб застосунок.
40. B. Coifman, M. McCord, M. Michalani, and K. Redmill, Surface Transportation Surveillance from Unmanned Aerial Vehicles, Proc. of 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2004
41. Burns E, Lindenmayer D, Tennant P, Dickman C, Green P, Hanigan I, Hoffmann A, Keith D, Metcalfe D, Nolan K, Russell-Smith J, Wardle G, Welsh A, Williams R, Yates C (2014). Making ecological monitoring successful: Insights and lessons from the Long Term Ecological Research Network, LTERN, Australia.
42. Krebs CJ (2012). Biodiversity monitoring in Canada's Yukon: the community ecological monitoring program. In Biodiversity monitoring in Australia, DB Lindenmayer and P Gibbons (eds), CSIRO Publishing, Melbourne, 157.
43. K. Kim, J. Davidson, Unmanned Aircraft Systems Used for Disaster Management, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2015, University of Hawaii
44. Teague E., and Kewly R.H. Jr. 2008. Swarming Unmanned Aircraft Systems, USMA.
45. Jeffrey, M.C., Subramanian, S., Yan, C., Emer, J., and Sanchez, D. 2015. A scalable architecture for ordered parallelism. IEEE International Symposium on Microarchitecture (MICRO), 48th Annual IEEE/ACM. pp. 228–241.
46. Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, Gaillard JM, Tucker CJ, Stenseth NC (2005) Using the satellite-derived normalized difference vegetation index (NDVI) to assess ecological effects of environmental change. Trends Ecol Evol 20:503–510

47. Pettorelli N, Gaillard JM, Mysterud A, Duncan P, Stenseth NC, De-lorme D, Van Laere G (2006) Using a proxy of plant productivity(NDVI) to track animal performance: the case of roe deer. *Oikos* 112:565–572
48. Huang, H-M. 2008. *Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework Volume I: Terminology* National Institute of Standards and Technology NIST Special Publication 1011-I-2.0.
49. Plathottam S., and Ranganathan, P. 2018. Next generation distributed and networked autonomous vehicles: Review. In *Proceedings of International Conference on Communication Systems and Networks, COMSNETS 2018*. pp. 577–582.
50. Pophale P, Ali M. 2016. Real time data mining using cyber physical system. *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.* 7(2): 957–959
51. Yong, D., Yuanpeng, Z., Yaqing, X., Yu, P., and Datong, L. 2017. Unmanned aerial vehicle sensor data anomaly detection using Kernel principal component analysis. *IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments 2017*. pp. 241–246.
52. Nilsson N.J. 1991. Logic and artificial intelligence. *Artif. Intell.* 47(1–3): 31–56.
53. Domingos, P. 2015. *The master algorithm: How the quest for the ultimate learning machine will remake our world*. Hachette Book Group.
54. Diestel, R. 1997. *Graph theory (Graduate texts in mathematics)*. Springer Verlag.
55. Russell, S.J., Norvig, P., and Davis, E. 2010. *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice Hall.
56. Plathottam S., and Ranganathan, P. 2018. Next generation distributed and networked autonomous vehicles: Review. In *Proceedings of International Conference on Communication Systems and Networks, COMSNETS 2018*. pp. 577–582.
57. Jung, D., and Tsiotras, P. 2007. Inertial attitude and position reference system development for a small UA. *AIAA Infotech at Aerospace 2007 Conference and Exhibit, AIAA paper 07–2763*.
58. Mao, G., Drake, S., and Anderson, B.D.O. 2007. Design of an extended Kalman filter for UAV localization. In *Proceedings of Conference on Information, Decision and Control 2007*. pp. 224–229.
59. Li X. 2013. A software scheme for UAV's safe landing area discovery. *AASRI Procedia*, 4: 230–235.
60. Guo, X., Denman, S., Fookes, C., Mejias, L., and Sridharan, S. 2014. Automatic UAV forced landing site detection using machine learning. In *Proceedings of the International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, DICTA 2014*. pp. 1–7.
61. Bekmezci I, Sahingoz O.K, Temel Ş. 2013. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3): 1254–1270.
62. Веб застосунок [Електронний ресурс]. – Точка доступу: URL: <http://ardupilot.org/planner/docs/swarming.html> – Веб застосунок.

63. Sivakumar A., and Tan, C. 2010. UAV swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone. In Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. pp. 1157–1164.
64. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel Ş. 2013. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3): 1254–1270.
65. Walter B., Sannier A., Reiners D., Oliver J.H. 2006. UAV swarm control: Calculating digital pheromone fields with the GPU. *J. Defense Model. Simul.* 3(3): 167–176.
66. Lamont, G.B., Slear, J.N., and Melendez, K. 2007. UAV swarm mission planning and routing using multi-objective evolutionary algorithms. *IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making*, IEEE, 2007. pp. 10–20.
67. Teague E., and Kewly R.H. Jr. 2008. *Swarming Unmanned Aircraft Systems*, USMA
68. Elston J., Frew E.W., Lawrence D., Gray P., Argrow B. 2009. Net-centric communication and control for a heterogeneous unmanned aircraft system. *J. Intell. Rob. Syst.* 56(1–2): 199–232.
69. Bürkle A., Segor F., Kollmann M. 2011. Towards autonomous micro UAV swarms. *J. Intell. Rob. Syst.* 61(1): 339–353.
70. Sahingoz O.K. 2014. Networking models in flying Ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges. *J. Intell. Rob. Syst.* 74(1–2): 513–527.
71. Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel Ş. 2013. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3): 1254–1270.
72. Sahingoz O.K. 2014. Networking models in flying Ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges. *J. Intell. Rob. Syst.* 74(1–2): 513–527.
73. Zhou, Y., Li, J., Lamont, L., and Rabbath, C.A. 2012. Modeling of packet dropout for UAV wireless communications 2012. *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2012. pp. 677–682.
74. ATT 2016. Qualcomm and AT&T to trial drones on cellular network to accelerate wide-scale deployment.
75. Qualcomm. 2016. Leading the world to 5G: Evolving cellular technologies for safer drone operation.
76. Веб застосунок [Електронний ресурс]. – Точка доступу: URL: <https://www.botlink.com/cellular-connectivity> – Веб застосунок.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
 КАФЕДРА ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ



**«Розробка методу автоматизованої побудови  
 траєкторії групи безпілотних літальних апаратів  
 при вирішенні задач зйомки місцевості»**

Виконав студент групи ПДМ-61  
 Назаренко Максим Анатолійович  
 Науковий керівник к.т.н., доцент  
Золотухіна Оксана Анатоліївна

Київ - 2021

***ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ***

2

***ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ*** – ПРОЦЕС АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИРШЕННІ ЗАДАЧ ЗЙОМКИ МІСЦЕВОСТІ.

***ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ*** – МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИРШЕННІ ЗАДАЧ ЗЙОМКИ МІСЦЕВОСТІ.

***МЕТА РОБОТИ*** – ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИРШЕННІ ЗАДАЧ ЗЙОМКИ МІСЦЕВОСТІ.

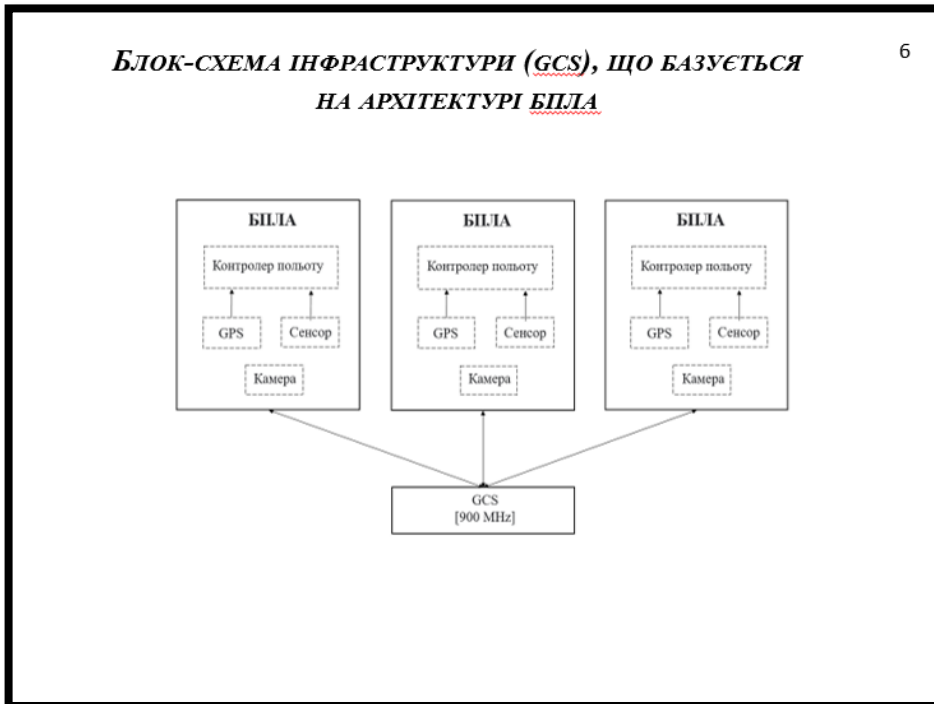
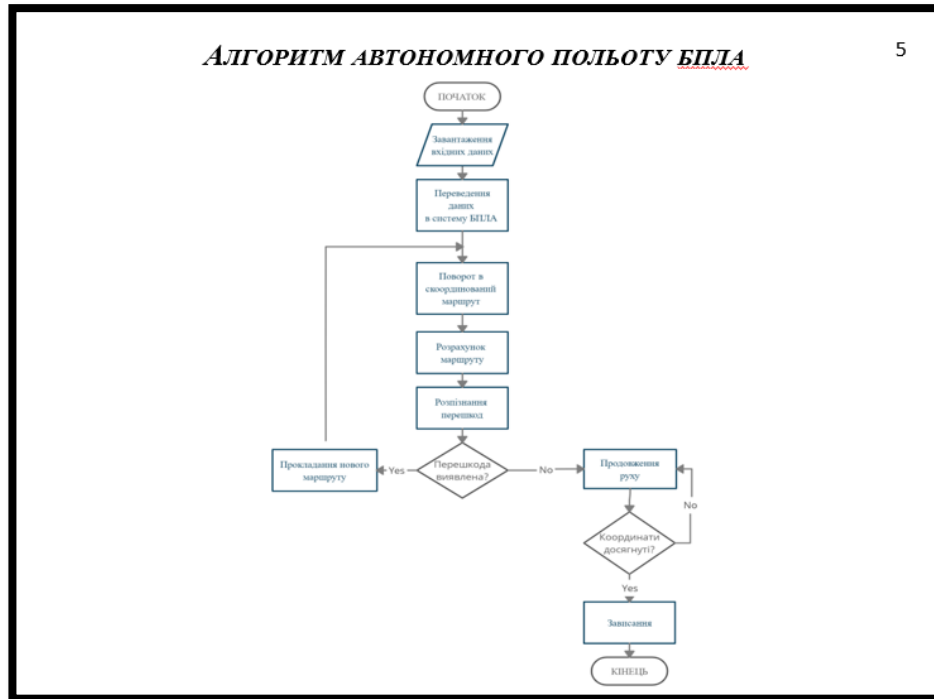
## ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ

3

Функціональність	Інтернет-генерація та навігація шляхів для групи БПЛА	Оптимальне планування шляху БПЛА за допомогою паралельного генетичного алгоритму	Fly-by-Logic: управління багатодронними флотами за логічними цілями	Планування шляху БПЛА з використанням алгоритму колонії мурашок	Гра безпілотників: теоретичні підходи до ігор для розподілу завдань із декількома роботами в місіях безпеки
Місія групою	+	-	+	-	+
Уникнення зіткнень	+/-	+	+/-	+	-
Уникнення перешкод	+/-	+	+	+	-
Планування групового шляху	+	-	-	-	-
Автоматизована побудова траєкторії	+	-	+	+	-
Підключення оператора до БПЛА	+	-	-	-	+
Планування шляху у ворожому середовищі	-	+	-	-	-

## БЛОК-СХЕМА ПОТОКУ ДАНИХ В КОМБІНОВАНІЙ СИСТЕМІ БПЛА 4

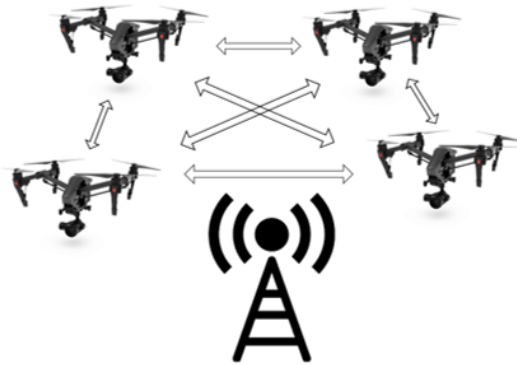






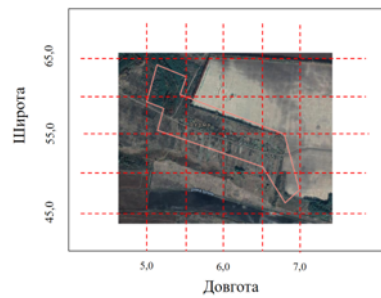
### АРХІТЕКТУРА ГРУПИ БПЛА ЧЕРЕЗ СТІЛЬНИКОВУ МЕРЕЖУ

7

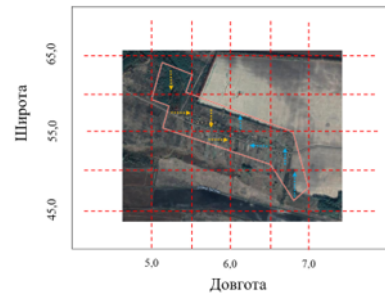


### ФРАГМЕНТИ РЕГІОНУ

8



РОЗДІЛ МІСЦЕВОСТІ НА ЧАСТИНИ

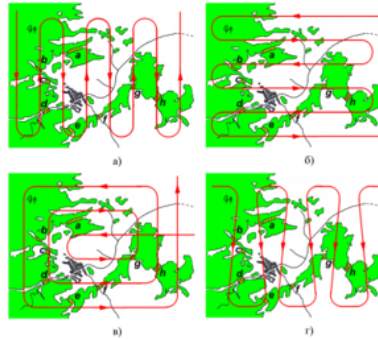


ПОБУДОВА ТРАЄКТОРІЇ ГРУПИ БПЛА

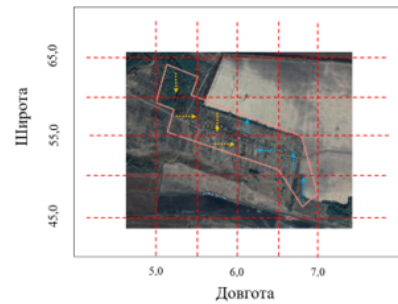
## ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ

9

### ІСНЮЮЧІ МЕТОДИ



### РОЗРОБЛЕНИЙ МЕТОД



## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЇ

10

Формула цінності для мінімізації затрати часу на зйомку в заданій точці:

$$a_k = \frac{1}{L_k} \quad (9.1)$$

де  $L_k$  – відстань між стартовою точкою, з якої стартує група, та центр К-зони

Накопичення цінності для всієї групи БПЛА:

$$A(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \quad (9.2)$$

де  $N$  – кількість БПЛА в групі

Функція прийняття для накопичуваної цінності кожного БПЛА на основі цінностей:

$$f_1(t, i, j) = \sum_{k=1}^{|CP_i(t) \cup j|} a_k \rightarrow \max \quad (9.3)$$

де  $i$  – номер БПЛА, що робить вибір;  $j$  – реперна точка доступна для вибору;

$CP_i$  – багато реперних точок, перевіреними  $i$ -м БПЛА до моменту часу  $t$

Функція прийняття для накопичуваної цінності кожного БПЛА на основі відстані:

$$f_1(t, i, j) = \frac{1}{\sqrt{(X_{i,j} - X_j)^2 + (Y_{i,j} - Y_j)^2}} \rightarrow \max \quad (9.4)$$

де  $(X_{i,j}; Y_{i,j})$  – координати останньої реперної точки  $i$ -го БПЛА;

$(X_j; Y_j)$  – координати потенційної  $j$ -ї реперної точки

### НАРОСТАННЯ ЦІННОСТЕЙ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ФУНКЦІЙ (9.3) І (9.4)

11



### ВИСНОВКИ

12

В результаті виконання дипломної роботи всі поставлені було виконано в повному обсязі.

1. Проаналізовано існуючі методи побудови траєкторії БПЛА, їх недоліки та переваги.
2. Розроблено метод автоматизованої побудови траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості.
3. Розроблено алгоритм автономного польоту БПЛА, послідовність прийняття рішення БПЛА, інфраструктура та архітектура групи БПЛА, розроблено математичну модель побудови траєкторії групи БПЛА.

За матеріалами опубліковані тези:

Назаренко М.А. Розробка автоматизованого методу побудови траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості. // Науково-технічна конференція «Сучасні інфокомунікаційні технології», ДУТ;

та стаття:

М.А.Назаренко «Розробка автоматизованого методу побудови траєкторії групи БПЛА при вирішенні задач зйомки місцевості», Журнал «Зв'язок», №6, 2020, Київ.

***ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!***