

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Пошивайло Олексій Максимович

УДК 004.45:629.735.072-519(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ГЕТЕРОГЕННИХ
ГРУП БПЛА ДЛЯ ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ

123 «Комп'ютерна інженерія»

12 «Інформаційні технології»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____

Пошивайло О.М.

Науковий керівник:

Кучеров Дмитро Павлович

Доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Пошивайло О.М. Інформаційна технологія побудови маршрутів гетерогенних груп БпЛА для покриття території.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю: 123 Комп'ютерна інженерія – Державний університет «Київський авіаційний інститут», МОН України, Київ, 2025.

Дана дисертаційна робота присвячена розробці та вдосконаленню алгоритмів покриття території роєм безпілотних літальних апаратів (БпЛА), що є актуальним завданням у сучасних умовах широкого використання ройових технологій для моніторингу, спостереження, пошуково-рятувальних операцій та інших практичних задач. Основна увага приділяється розробці гнучкого, масштабованого алгоритму, що здатен адаптуватися до різних типів роїв і територій, враховуючи гетерогенність дронів і можливі динамічні зміни в середовищі.

У ході дослідження було запропоновано генетичний алгоритм для визначення оптимальних початкових положень дронів у рої, що дозволяє мінімізувати витрати енергії на покриття території та знизити кількість перетинів між траєкторіями дронів. Алгоритм також забезпечує розподіл території на сектори відповідно до характеристик кожного дрона в рої, що сприяє рівномірному навантаженню на рій і максимізації ефективності покриття.

Експериментальна частина роботи охоплює три сценарії тестування алгоритму для роїв різних типів та на територіях різної складності. Результати показали, що запропонований алгоритм здатний забезпечити ефективне покриття як для однорідних роїв на простих територіях, так і для гетерогенних роїв на складних ділянках із нерегулярною геометрією.

Наукова новизна роботи полягає у впровадженні нових підходів до оптимізації покриття території роями БпЛА з урахуванням динамічних змін середовища та гетерогенності рою. Практичне значення полягає у можливості застосування розробленого алгоритму для широкого спектра реальних завдань, зокрема в сферах екологічного моніторингу, пошуково-рятувальних операцій, інфраструктурних інспекцій та військових задач.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальших досліджень і вдосконалень у галузі ройових технологій, а також знайти практичне застосування в автоматизації процесів управління роями БпЛА в реальних умовах.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, рій дронів, покриття території, генетичний алгоритм, оптимізація маршрутів, гетерогенний рій, алгоритми маршрутизації, моніторинг територій, масштабованість

ABSTRACT

Poshyvailo O.M. Information technology for route planning of heterogeneous UAV groups for area coverage.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in the specialty: 123 Computer Engineering – State University "Kyiv Aviation Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

This dissertation is devoted to developing and improving algorithms for covering territory with a swarm of unmanned aerial vehicles (UAVs), which is an important task in modern conditions of widespread use of swarm technologies for monitoring, surveillance, search and rescue operations, and other practical applications. The main focus is on developing a flexible, scalable algorithm capable of adapting to different types of swarms and territories, taking into account the heterogeneity of drones and potential dynamic changes in the environment.

The study proposes a genetic algorithm for determining the optimal initial positions of drones in a swarm, which allows for minimizing energy consumption for territory coverage and reducing the number of overlaps between drone trajectories. The algorithm also provides for dividing the territory into sectors according to the characteristics of each drone in the swarm, ensuring even load distribution and maximizing coverage efficiency.

The experimental part of the study includes three scenarios for testing the algorithm with different types of swarms and territories of varying complexity. The results showed that the proposed algorithm is capable of providing effective coverage for both homogeneous swarms in simple territories and heterogeneous swarms in complex areas with irregular geometry.

The scientific novelty of the work lies in the introduction of new approaches

to optimizing the coverage of territories by UAV swarms, taking into account dynamic changes in the environment and swarm heterogeneity. The practical significance of the research lies in the possibility of applying the developed algorithm to a wide range of real-world tasks, particularly in the fields of environmental monitoring, search and rescue operations, infrastructure inspections, and military applications.

The obtained results can serve as a basis for further research and improvements in the field of swarm technologies, as well as finding practical applications in automating swarm UAV management processes under real-world conditions.

Keywords: unmanned aerial vehicles, drone swarm, territory coverage, genetic algorithm, route optimization, heterogeneous swarm, routing algorithms, territory monitoring, scalability.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kucherov D., Shmelova T., Poshyvailo O. Assessing the Readiness of UAS Operators Based on the Simulator Training Results. CEUR Workshop Proceedings. 2023. Vol. 3624. P. 94–105.
2. Kucherov D., Kozub A., Tkachenko V., Rosinska G., Poshyvailo O. PID Controller Machine Learning Algorithm Applied to the Mathematical Model of Quadrotor Lateral Motion. IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD 2021): Proceedings. 2021. P. 86–89.
3. Kucherov D., Tkachenko V., Khalimon N., Poshyvailo O. Signals and Image Processing in Information Systems by Tensor Analysis Methods. 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT 2022): Proceedings. 2022. P. 277–280.
4. Kucherov D., Shmelova T., Poshyvailo O., Tkachenko V., Miroshnichenko I., Ogirko I. Mathematical Model of Damping of UAV Oscillations in the Cargo Delivery Problem. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPI-Week 2023): Proceedings. 2023. P. 1–6.
5. Kucherov D., Poshyvailo O., Miroshnichenko I. Dynamics of UAV Discrete-Continuous Terminal Control System. 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC 2023): Proceedings. 2023. P. 66–69.
6. Kucherov D., Dolgikh S., Miroshnichenko I., Poshyvailo O. Protocol and Logical Models for Robustness and Survivability in Autonomous UAV Systems. 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologi-

es (DESSERT 2023): Proceedings. 2023. P. 1–7.

7. Кучеров Д.П., Перепеліцин С.О., Пошивайло О.М., Мирошніченко І.В. Налаштування ПД-регулятора генетичним алгоритмом за багатокритеріальною цільовою функцією для керування нестійким об'єктом. Проблеми управління і інформатизації. 2023. № 4(76). С. 42–47.

8. Kuchеров D., Shmelova T., Dolgikh S., Poshyvailo O., Miroshnichenko I., Shaptala S. Consensus Protocols for Improved Survivability in Autonomous Groups of UAV. 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services, and Technologies (DESSERT 2023): Proceedings. 2023. P. 21–24.

9. Kuchеров D., Dolgikh S., Myroshnychenko I., Poshyvailo O., Kravchenko O. A Flight Situation Advisory System for Uninterrupted and Efficient Air Transportation. 5th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2024): Proceedings. 2024. P. 1–10.

10. Кучеров Д. П., Пошивайло О. М., Мирошніченко І. В. Моделювання налаштування ПД-регулятора за допомогою генетичного алгоритму по багатокритеріальній цільовій функції для керування нестійкими об'єктами. Інформаційні технології і безпека: матеріали ХХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції ІТБ-2023. Київ. Інжиніринг. 2023. С. 84–88.

11. Козуб А. М., Кучеров Д. П., Пошивайло О. М. Рекомендаційна система для ефективного функціонування повітряного транспорту в складних умовах польоту. Комп'ютерні системи та мережні технології (CSNT-2024): зб. тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції. Київ. НАУ. 2024. С. 83–84.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 :Теоретичні аспекти ройових технологій	20
1.1 Використання рою БпЛА	20
1.2 Основні принципи та теорії оптимізації	27
1.3 Покриття території роями БпЛА	42
1.4 Масштабування та гетерогенність роїв БпЛА	48
1.5 Висновки до розділу	54
РОЗДІЛ 2 :Методологія дослідження алгоритму покриття території	57
2.1 Обґрунтування вибору методології	57
2.2 Ключові етапи дослідження	60
2.3 Якісні характеристики дослідження	62
2.4 Кількісні характеристики дослідження	63
2.5 Висновок до розділу	64
РОЗДІЛ 3 :Розробка алгоритму покриття території роєм БпЛА	66
3.1 Визначення початкового положення кожного дрона	67
3.2 Розподіл території на сектори під кожен дрон	79
3.3 Знаходження маршруту для покриття кожного сектору	83
3.4 Висновки до розділу	87
РОЗДІЛ 4 :Перевірка алгоритму покриття території роєм БпЛА	88

4.1	Невеликий рій дронів для покриття простої території	88
4.2	Рій середнього розміру на території нестандартної форми	102
4.3	Великий гетерогенний рій на території зі складною геометрією .	110
4.4	Тестування маршруту покриття сектору в симуляційному середовищі	117
4.5	Висновок до розділу	119
РОЗДІЛ 5 :Аналіз результатів перевірки алгоритму покриття території .		121
5.1	Аналіз кількісних характеристик	121
5.2	Аналіз якісних характеристик	130
5.3	Висновки до розділу	135
ВИСНОВКИ		137
ДОДАТОК А		140
ДОДАТОК Б		141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		142

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА	— безпілотний літальний апарат.
РБПЛА	— рій безпілотних літальних апаратів.
ГА	— генетичний алгоритм.
УАС	— управління автономними системами.
ІКТ	— інформаційно-комунікаційні технології.
UAV	— Unmanned Aerial Vehicle (безпілотний літальний апарат).
UAS	— Unmanned Aerial System (безпілотна авіаційна система).
PX4	— програмне забезпечення для управління безпілотниками.
ROS	— Robot Operating System (операційна система для роботів).
МС	— машинне навчання.
МАР	— маршрутизація апаратів на реальній території.
БД	— база даних.
GPS	— Global Positioning System (глобальна навігаційна система).
INS	— Inertial Navigation System (інерціальна навігаційна система).

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку технологій безпілотні літальні апарати (БпЛА) стали важливим інструментом для виконання багатьох завдань у різних сферах, таких як моніторинг навколишнього середовища, картографування територій, сільське господарство, пошуково-рятувальні операції, спостереження та військова розвідка. Зростаюча потреба в автоматизованих системах, здатних виконувати великомасштабні завдання з мінімальним людським втручанням, підвищує актуальність досліджень у сфері оптимізації використання БпЛА, особливо у складі рою.

Однак із збільшенням кількості дронів у рої зростають і виклики, пов'язані з координацією їхньої роботи, оптимізацією маршрутів, мінімізацією витрат енергії та забезпеченням повного покриття заданої території. У реальних умовах БпЛА можуть працювати на різних типах територій із різними рівнями складності, де можуть бути присутні природні або штучні перешкоди, різноманітний рельєф, зміни погоди та інші динамічні фактори. Ці чинники значно ускладнюють завдання планування та виконання операцій із покриття території, вимагаючи розробки гнучких алгоритмів, які можуть адаптуватися до змінних умов.

Забезпечення ефективного покриття території роєм БпЛА є ключовим завданням для багатьох галузей. Рішення цього завдання дозволяє знизити витрати часу, енергії та ресурсів, збільшуючи точність і швидкість виконання операцій. Проте стандартні підходи до покриття території не завжди забезпечують необхідну ефективність, особливо коли мова йде про рої дронів із різними характеристиками та можливостями.

Особливої актуальності це питання набуває у випадках, коли рій скла-

дається з гетерогенних дронів, які мають різні характеристики (такі як розміри, ємність батареї, швидкість і висота польоту). У таких умовах потрібно не лише забезпечити рівномірне навантаження на кожен дрон, але й мінімізувати перекриття зон покриття та оптимізувати використання енергії кожного БПЛА. Це вимагає застосування інноваційних підходів до розробки алгоритмів, здатних адаптуватися до різноманітних сценаріїв покриття території.

Крім того, зростаюча складність сучасних задач покладає додаткові вимоги до системи покриття. Такі завдання, як пошуково-рятувальні операції або спостереження за великими територіями, вимагають швидкого та ефективного покриття, де кожен дрон у рої повинен діяти максимально злагоджено. При цьому важливо враховувати ймовірні динамічні зміни в середовищі, такі як поява перешкод або зміни в обсязі завдань, що потребує високої гнучкості алгоритмів та їх здатності до швидкої адаптації.

Актуальність цієї теми також полягає в тому, що на сучасному етапі розвитку технологій особлива увага приділяється масштабованості систем покриття території. Необхідно розробити такі алгоритми, які могли б ефективно працювати не тільки в умовах невеликих роїв і обмежених територій, але й у ситуаціях, коли рої налічує сотні дронів, що повинні покривати великі площі.

Отже, розробка гнучких і масштабованих алгоритмів покриття території роєм БПЛА з урахуванням їх гетерогенності, динамічних змін у середовищі та обмежених ресурсів є надзвичайно актуальним завданням. Такий підхід дозволить забезпечити ефективне використання дронів у складних і мінливих умовах, що сприятиме підвищенню їхньої продуктивності та надійності у виконанні різноманітних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Відповідно до постанови Національної академії наук України про затвердження основних наукових напрямків та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук на 2019-2023 роки, одним із переліку галузей дисциплін є розвиток теорії алгоритмів та обчислень, у тому числі паралельних. Також, відповідно до постанови Національної академії наук України про затвердження основних наукових напрямків та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук на 2024-2028 роки, одним із переліку галузей дисциплін є створення методів керованої взаємодії групи безпілотних апаратів і мобільних роботів. Дослідження проведені у ході дисертаційної роботи прямо відповідають цим науковим напрямкам.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є розробка та вдосконалення алгоритмів покриття території роєм безпілотних літальних апаратів, які забезпечують ефективне управління роями в умовах гетерогенних дронів і змінних характеристик середовища. Особлива увага приділяється оптимізації маршрутів дронів для мінімізації енергетичних витрат та зниженню перекриття територій при покритті, що дозволить значно підвищити продуктивність системи в реальних умовах.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі підходи до управління роями БпЛА та методи покриття території, зокрема використання генетичних алгоритмів та інших еволюційних методів.
2. Розробити алгоритм оптимізації початкових положень дронів у рої для забезпечення рівномірного покриття території з мінімальними витратами

енергії та зниженням кількості перетинів між траєкторіями дронів.

3. Адаптувати запропонований алгоритм для різних типів роїв, включаючи гомогенні та гетерогенні рої дронів, з урахуванням їх можливостей і обмежень.
4. Розробити метод розподілу території на сектори відповідно до характеристик кожного дрона в рої для підвищення ефективності покриття.
5. Провести експериментальне тестування розробленого алгоритму на різних типах територій, зокрема на простих і складних за формою та структурою ділянках.
6. Оцінити ефективність запропонованих алгоритмів за допомогою кількісних та якісних критеріїв, таких як площа покриття, мінімізація перекриттів та гнучкість алгоритму.
7. Виявити недоліки існуючих підходів та розробити шляхи їх подолання, зокрема оптимізувати алгоритм для динамічних середовищ з непередбачуваними змінами та перешкодами.

Виконання цих завдань дозволить забезпечити розробку гнучкого, масштабованого та адаптивного алгоритму управління роєм БпЛА, який можна буде ефективно застосовувати для вирішення широкого спектра практичних завдань, зокрема у сферах моніторингу, розвідки та пошуково-рятувальних операцій.

Об'єкт дослідження. Процес побудови маршрутів групи безпілотних літальних апаратів для покриття території в різних умовах.

Предмет дослідження. Побудова маршрутів групи БпЛА з використанням генетичних алгоритмів та діаграм Вороного.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених у роботі цілей

були використані як теоретичні, так і експериментальні методи дослідження. Основними методами дослідження стали математичне моделювання, розробка спеціалізованого програмного забезпечення, а також використання готових програмних продуктів.

Математичне моделювання було застосоване для побудови моделей роботи рою БпЛА та алгоритмів покриття території. На основі математичних моделей проводився аналіз поведінки рою та оптимізація траєкторій руху дронів, що дозволило забезпечити ефективне управління роєм та мінімізувати витрати ресурсів під час виконання місії.

Для реалізації та тестування запропонованих алгоритмів було розроблено власне програмне забезпечення, що дозволило виконувати комп'ютерні симуляції і моделювати реальні сценарії покриття території різними типами роїв. Крім того, для управління роями БпЛА були використані готові програмні продукти, такі як PX4 Autopilot та QGroundControl, які забезпечують безпосередню інтеграцію з апаратним забезпеченням дронів і дозволяють ефективно контролювати їхнє виконання завдань у польових умовах.

PX4 Autopilot був використаний як основна платформа для управління БпЛА, що дозволило забезпечити точне керування польотом дронів і автоматизацію виконання завдань на основі запропонованих алгоритмів. Програмне забезпечення QGroundControl використовувалося для планування місій та моніторингу стану дронів у режимі реального часу, що забезпечило можливість детального контролю над процесом виконання місій та корекції маршруту у разі необхідності.

Комплексне використання математичних методів, власного програмного забезпечення та готових продуктів дозволило забезпечити повну інтеграцію

системи управління роєм БпЛА та отримати об'єктивні результати під час експериментальних тестувань.

Наукова новизна одержаних результатів. У даній дисертаційній роботі вперше запропоновано та реалізовано алгоритми покриття території роєм БпЛА, які враховують гетерогенність дронів та дозволяють ефективно оптимізувати процес покриття території з мінімізацією витрат енергії та перекриттів між траєкторіями. Наукова новизна роботи полягає в наступних аспектах:

1. Вперше розроблено генетичний алгоритм для визначення оптимальних початкових положень дронів у рої з урахуванням їх габаритів, можливостей та обмежень. Запропонований підхід забезпечує рівномірне покриття території з мінімальними витратами ресурсів.
2. Запропоновано новий підхід до розподілу території на сектори відповідно до характеристик дронів у гетерогенному рої. Цей підхід дозволяє ефективно розподіляти завдання між дронами з різними можливостями, мінімізуючи кількість перетинів і максимізуючи площу покриття.
3. Вперше розроблено алгоритм маршрутизації для рою БпЛА, який враховує складну геометрію території та гетерогенність дронів. Алгоритм дозволяє оптимізувати маршрути польоту дронів з урахуванням різних типів місцевості, що дозволяє підвищити ефективність покриття.
4. Вперше проведено комплексне експериментальне дослідження роботи розробленого алгоритму для різних типів роїв (гомогенних і гетерогенних), а також для різних типів територій (прості та складні геометричні форми), що дозволило продемонструвати його ефективність та масштабованість.
5. Розроблені нові кількісні та якісні критерії оцінки ефективності алго-

ритму покриття території, що дозволяють проводити детальний аналіз роботи системи з точки зору площі покриття, мінімізації перекриттів, енергетичних витрат та гнучкості алгоритму.

Наукова новизна роботи полягає в розробці та впровадженні підходів, що забезпечують підвищення ефективності покриття території у різних сценаріях, зокрема для роїв з дронами різних типів та в умовах динамічних змін середовища. Запропоновані рішення можуть бути використані для широкого спектру завдань, зокрема у моніторингу, пошуково-рятувальних операціях та військовій розвідці.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці ефективного алгоритму покриття території роєм безпілотних літальних апаратів який може бути використаний у різних сферах для вирішення прикладних завдань. Запропонований підхід має високу гнучкість і масштабованість, що дозволяє адаптувати алгоритм до різних типів роїв, як гомогенних, так і гетерогенних, а також до різних типів територій, включаючи складні геометричні форми та динамічні зміни середовища.

Результати дослідження можуть бути застосовані у багатьох сферах, зокрема в моніторингу та нагляді за великими територіями, що є важливим для екологічного моніторингу, лісового господарства, сільського господарства та охорони навколишнього середовища. Алгоритм також може підвищити ефективність пошуково-рятувальних операцій, зокрема у випадках пошуку зниклих осіб або виявлення об'єктів на територіях з обмеженим доступом або складними умовами.

У військових і оборонних задачах алгоритм покриття території роєм БПЛА може використовуватися для розвідки, спостереження та збору даних

в умовах обмеженого часу або у небезпечних зонах, з мінімізацією ризику для людей. Крім того, алгоритм може застосовуватися для інфраструктурних інспекцій, таких як моніторинг стану доріг, мостів, ліній електропередач та трубопроводів, що забезпечує швидке виявлення пошкоджень або дефектів.

У сільському господарстві цей алгоритм може бути використаний для точного сільського господарства, зокрема для моніторингу полів, оцінки врожайності, виявлення захворювань рослин та оптимізації процесів обприскування або поливу. Розроблені алгоритми можуть бути інтегровані в існуючі системи управління роями БПЛА або використовуватися як основа для створення нових програмних рішень, забезпечуючи можливість автоматизації процесів покриття територій. Крім того, результати роботи можуть слугувати базою для подальших досліджень у сфері ройових технологій та управління безпілотними системами в реальних умовах.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Здобувачем розроблено концепцію дослідження, сформульовано мету та завдання роботи. Автором проведено аналіз існуючих підходів до покриття території роєм безпілотних літальних апаратів та запропоновано нові алгоритмічні рішення для оптимізації цього процесу. Здобувач особисто розробив і впровадив генетичний алгоритм для визначення оптимальних початкових положень дронів у рої, а також реалізував алгоритми розподілу території на сектори з урахуванням характеристик кожного дрона. Автором також було проведено комп'ютерне моделювання і симуляції для тестування розроблених алгоритмів на різних типах територій та роїв дронів. Частка особистої участі здобувача в публікаціях із співавторами становить 40–50

Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено в 12 наукових публікаціях, серед них 1 публікація у науковому фаховому виданні України, 1 стаття у закордонному періодичному виданні; відношеному до Q3 квартиля (класифікація SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), 9 публікацій у збірниках матеріалів конференцій, 8 із них входять до міжнародної наукометричної бази даних (Scopus) та 1 науковий патент на винахід.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження були оприлюднені на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних, всеукраїнських та за міжнародною участю: “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments” (APUAVD) (Київ, 2021), “Advanced Trends in Information Theory (ATIT)” (Україна, 2022), “4th KhPI Week on Advanced Technology” (KhPIWeek) (Харків, 2023), “Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)” (Київ, 2023), “Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)” (Афіни, Греція, 2023), “Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matter” (ICSF) (Кривий Ріг, 2024).

Структура та обсяг дисертації. Матеріали дисертації викладено на 153 сторінках комп’ютерного набору, з них основного тексту – 139 сторінок. Дисертація містить анотацію, вступ, п’ять розділів, висновки та 2 додатки, список використаних джерел нараховує 89 пунктів.

РОЗДІЛ 1

Теоретичні аспекти ройових технологій

1.1. Використання рою БпЛА

Ройові технології БпЛА розглядаються як революційний підхід до виконання широкого спектру завдань, від простого моніторингу та спостереження до складних військових та рятувальних операцій. Основною перевагою роїв БпЛА є їхня здатність до колективної взаємодії та виконання задач, які були б недосяжними для одиничних апаратів. Цей підхід значно підвищує ефективність виконання завдань, дозволяючи роям БпЛА адаптуватися до змінних умов середовища, ефективно розподіляти ресурси та виконувати завдання з високою ступенем автономності та гнучкості.

Використання роїв БпЛА вимагає глибокого розуміння принципів колективної поведінки, алгоритмів самоорганізації, а також стратегій планування та управління. Це також ставить перед дослідниками виклики, пов'язані з координацією дій між апаратами в рої, забезпеченням їхньої безпеки та надійності, а також розробкою ефективних методів комунікації та обміну даними. В цьому контексті особливу увагу приділяється масштабованості роїв БпЛА та їхній здатності до взаємодії з різними типами апаратів, що відкриває шлях для створення гетерогенних роїв, здатних виконувати надзвичайно складні завдання в різноманітних середовищах.

Цей розділ покликаний охопити ключові аспекти технології роїв БпЛА, включаючи їхній потенціал, можливості та області застосування, а також розглянути існуючі виклики та перспективи розвитку цієї галузі.

1.1.1. Застосування БпЛА в сільському господарстві

У сучасному сільському господарстві використання безпілотних літальних апаратів стає все більш поширеним, відкриваючи нові можливості для підвищення ефективності аграрного виробництва та сталого розвитку. БпЛА вносять значний вклад у розвиток точного землеробства, надаючи фермерам змогу збирати великі масиви даних про стан посівів і земельних угідь. Ці апарати здатні здійснювати регулярний моніторинг стану посівів, виявляти проблемні зони та дозволяти оперативно реагувати на потреби рослин, використовуючи камери високої роздільної здатності та спеціалізовані сенсори для детальної оцінки стану вегетації.

БпЛА також використовуються для створення детальних карт земельних угідь, дозволяючи точно визначати межі полів, оцінювати рівень родючості ґрунтів та планувати розміщення культур, що сприяє оптимізації використання земельних ресурсів. Оцінка врожайності з використанням БпЛА допомагає у точному прогнозуванні врожаїв, забезпечуючи фермерам важливу інформацію для прийняття рішень щодо збирання врожаю та його зберігання. Дані, отримані з БпЛА, можуть бути використані для ефективного планування іригаційних заходів, дозволяючи точно визначати зони з недостатнім зволоженням та оптимізувати споживання водних ресурсів. Інформація, зібрана БпЛА, сприяє також ранньому виявленню шкідників та хвороб, дозволяючи своєчасно застосовувати заходи захисту рослин і мінімізувати використання пестицидів.

У сучасному сільському господарстві, використання БпЛА дозволяє значно підвищити ефективність аграрного виробництва через точний моніторинг стану посівів і земельних угідь. Це безпосередньо пов'язано з оптимізацією

покриття території, оскільки рої БпЛА можуть систематично охоплювати великі аграрні ділянки, забезпечуючи точні дані для аналізу та прийняття рішень, спрямованих на підвищення урожайності і ефективніше використання ресурсів.

1.1.2. Застосування в екологічному моніторингу

Безпілотні літальні апарати стають незамінним інструментом у сфері екологічного моніторингу, надаючи вченим та екологам змогу збирати детальні дані про навколишнє середовище з високою точністю та ефективністю. Ці апарати здатні швидко охоплювати великі території, надаючи актуальну інформацію про стан лісів, водойм, диких тварин та інших природних ресурсів. БпЛА застосовуються для моніторингу лісів, дозволяючи виявляти зміни в рослинності, оцінювати наслідки лісових пожеж, виявляти незаконну вирубку дерев та моніторити процеси відновлення лісів. Вони також використовуються для моніторингу водойм, де допомагають в оцінці якості води, виявленні забруднення та моніторингу міграції водних тварин.

Окрім цього, БпЛА сприяють дослідженню та збереженню дикої природи, надаючи можливість відстежувати популяції тварин, вивчати їхнє природне середовище та поведінку без втручання в їхні природні звичаї. Це дає змогу краще розуміти потреби дикої природи та розробляти ефективні стратегії її збереження.

Застосування БпЛА в екологічному моніторингу не обмежується лише збором даних; воно також включає аналіз отриманої інформації для розробки ефективних заходів зі збереження екосистем та біорізноманіття. Такий підхід дозволяє своєчасно реагувати на екологічні зміни та вживати необхідні заходи для запобігання екологічним кризам або мінімізації їх наслідків.

Безпілотні літальні апарати є незамінними в сфері екологічного моніторингу, дозволяючи вченим отримувати важливі дані про стан довкілля. Рої БпЛА можуть бути використані для детального картографування екологічних зон, що дозволяє оптимізувати покриття території при зборі даних. Це не тільки підвищує ефективність моніторингу, але й сприяє швидкому виявленню та реагуванню на екологічні зміни або загрози.

1.1.3. Дослідження та рятувальні операції

Безпілотні літальні апарати стають невід'ємною частиною дослідницьких та рятувальних операцій, надаючи безпрецедентні можливості для швидкої та ефективної відповіді на надзвичайні ситуації, а також для проведення глибоких наукових досліджень. Їх здатність до швидкого охоплення великих територій та доступу до важкодоступних місць робить БпЛА незамінним інструментом у ситуаціях, де кожна секунда на рахунку, а також у сферах, де потрібен збір даних з ризикованих або віддалених локацій.

У сфері пошуку та рятування БпЛА використовуються для швидкого пошуку людей, які зникли або потрапили у біду в результаті природних катастроф, аварій або інших надзвичайних подій. Завдяки високоякісним камерам і тепловізорам, БпЛА здатні ідентифікувати місцезнаходження людей у важкодоступних районах, таких як гори, ліси або зони стихійного лиха, значно прискорюючи процес рятування та зменшуючи ризики для рятувальних команд.

Крім того, БпЛА застосовуються для оцінки наслідків стихійних лих та інших катастроф. Вони можуть швидко надати детальний огляд пошкоджених територій, дозволяючи оперативно оцінити масштаби збитків, виявити найбільш постраждалі області та спланувати ефективну допомогу та віднов-

лювальні роботи. Такий підхід є особливо важливим для оптимізації розподілу ресурсів та координації дій між різними службами допомоги.

У наукових дослідженнях БпЛА використовуються для збору даних у складних або небезпечних умовах, включаючи моніторинг змін клімату, вивчення дикої природи та екосистем, зон виверження вулканів та інших феноменів. Це дозволяє науковцям отримувати цінну інформацію без необхідності фізичної присутності в потенційно небезпечних або віддалених локаціях.

Використання БпЛА в дослідженнях і рятувальних операціях може бути значно покращене за рахунок оптимізації покриття території роєм БпЛА. Це особливо важливо у надзвичайних ситуаціях, де потрібно швидко охопити велику територію для пошуку людей або оцінки збитків. Рої БпЛА можуть ефективно розподіляти задачі між апаратами, максимізуючи покриття областей і мінімізуючи час, необхідний для виконання місії.

1.1.4. Інфраструктурні інспекції

Безпілотні літальні апарати революціонізували процес інфраструктурних інспекцій, пропонуючи швидкий та ефективний засіб для оцінки стану критично важливих об'єктів, таких як мости, дороги, електропередачі, вітрові турбіни та інші. Завдяки можливості покривати великі площі за короткий час і забезпечувати доступ до важкодоступних місць, БпЛА надають детальні візуальні дані про пошкодження або знос інфраструктурних об'єктів, включаючи тріщини, корозію, зсуви та інші проблеми, що можуть вимагати негайного втручання.

Використання БпЛА для інспекцій не лише знижує витрати та час, потрібний для оцінки стану інфраструктури, але й підвищує безпеку, оскільки усуває необхідність у фізичному доступі до потенційно небезпечних або

складних для досягнення місць. Більше того, збір даних високої якості, які можуть бути використані для створення детальних 3D-моделей об'єктів, дозволяє інженерам проводити глибокий аналіз стану інфраструктури та планувати ремонтні роботи з урахуванням отриманої інформації.

Інспекції інфраструктури з допомогою БпЛА також сприяють плануванню та розробці нових інфраструктурних проєктів, оскільки дозволяють ідентифікувати оптимальні маршрути для доріг або визначати найкращі місця для розміщення нових об'єктів на основі детального аналізу існуючих умов місцевості.

Інспекції інфраструктури за допомогою роїв БпЛА значно підвищують ефективність і безпеку огляду критично важливих об'єктів. Оптимізація покриття території дозволяє рою БпЛА систематично оглядати об'єкти, забезпечуючи детальне виявлення проблем або пошкоджень. Це допомагає не тільки зменшити час та витрати на інспекції, але й підвищити рівень безпеки, мінімізуючи потребу в ручних оглядах.

1.1.5. Військові застосування

Безпілотні літальні апарати значно змінили ландшафт військових операцій, пропонуючи нові можливості для розвідки, спостереження, доставки вантажів та навіть ударних операцій. Завдяки їхній здатності оперативно збирати важливу розвідувальну інформацію без прямого втручання людини, БпЛА стають незамінними у сучасних військових кампаніях, дозволяючи командуванню приймати обґрунтовані рішення на основі актуальних даних.

Використання БпЛА для розвідки та спостереження дозволяє збирати інформацію про розташування противника, його переміщення та діяльність без ризику для життя солдатів. Це не лише покращує обізнаність на полі

бою, але й сприяє плануванню більш ефективних тактичних маневрів. БпЛА також знайшли застосування у доставці вантажів, особливо в складних та небезпечних умовах. Вони можуть транспортувати медичні матеріали, боєприпаси та інше обладнання в зони бойових дій або віддалені локації, мінімізуючи потребу у використанні традиційних конвоїв, які можуть бути вразливими до атак.

Окрім того, деякі БпЛА оснащені зброєю для проведення точних ударів по визначених цілях, що дозволяє знищувати ворожі об'єкти або техніку з мінімальними колатеральними втратами. Таке застосування БпЛА забезпечує військовим перевагу, дозволяючи вести дії з великої відстані та з меншим ризиком для власних сил.

Незважаючи на переваги, військове застосування БпЛА також порушує питання етики та законності, особливо стосовно використання озброєних дронів. Також існують технічні та оперативні виклики, пов'язані з інтеграцією БпЛА у військові системи, забезпеченням їх захисту від електронного перехоплення та протидією антидроновим технологіям.

У військових застосуваннях, оптимізація покриття території роєм БпЛА може значно покращити ефективність розвідувальних операцій та надання допомоги. Рої БпЛА можуть бути задіяні для швидкого охоплення великих територій, збору розвідданих та навіть доставки вантажів, оптимізуючи при цьому розподіл ресурсів та ефективність виконання завдань. Враховуючи швидкий розвиток технологій БпЛА, військове застосування цих апаратів продовжуватиме еволюціонувати, відкриваючи нові тактичні можливості та водночас ставлячи перед командуванням та розробниками нові завдання для забезпечення ефективної та відповідальної експлуатації цих систем.

1.2. Основні принципи та теорії оптимізації

1.2.1. Еволюційні алгоритми

Еволюційні алгоритми (ЕА) є класом алгоритмів оптимізації, що наслідують механізми природного відбору та генетичної еволюції. Вони використовують такі операції, як селекція, кросовер (схрещування), та мутація, для генерування рішень до задачі, виходячи з популяції потенційних варіантів. Ці алгоритми особливо ефективні для розв'язання складних та багатовимірних задач, де традиційні методи можуть не знайти оптимальне рішення.

Застосування ЕА у плануванні маршруту для рою БпЛА Планування маршруту для рою БпЛА вимагає врахування численних змінних та обмежень, таких як уникнення перешкод, оптимізація дальності польоту та забезпечення ефективного покриття цільової зони. Еволюційні алгоритми пропонують потужний інструмент для розробки стратегій планування маршруту, що здатні адаптуватися до динамічних умов та оптимізувати багатоцільові критерії.

Ключові аспекти використання ЕА у формуванні маршрутів БпЛА

- Гнучкість та адаптивність: ЕА можуть ефективно пристосовуватися до змін у середовищі та місійних цілях, забезпечуючи високу гнучкість планування маршрутів.
- Багатоцільова оптимізація: Завдяки здатності одночасно оптимізувати кілька параметрів (наприклад, мінімізація часу польоту та максимізація покриття), ЕА дозволяють знаходити баланс між різними цілями місії.
- Масштабованість: ЕА ефективно масштабуються для розв'язання задач з великою кількістю агентів, дозволяючи керувати складними групами.

Генетичні алгоритми

При розгляді принципів та потенціалу еволюційних алгоритмів (ЕА) у контексті планування маршрутів для рою БпЛА, важливо звернути увагу на один з найбільш розповсюджених та ефективних підтипів ЕА — генетичні алгоритми. Теоретичні основи генетичних алгоритмів (ГА) глибоко вкорінені в біологічні принципи еволюції та природного відбору, що були адаптовані для розв'язання складних оптимізаційних задач. ГА використовують популяцію потенційних рішень, що еволюціонує через застосування операторів, імітуючих біологічні процеси, такі як селекція, кросовер (рекомбінація) та мутація. Ось детальний огляд кожного з цих аспектів:

Селекція Процес селекції імітує природний відбір, де найсильніші індивіди мають більшу ймовірність передачі своїх генів наступному поколінню. У контексті ГА, це означає, що рішення з кращими значеннями функції пристосованості ("фітнес") мають вищі шанси бути обрані для участі у створенні наступного покоління рішень.

Кросовер Кросовер, або рекомбінація, є серцевиною еволюційного пошуку ГА, дозволяючи створювати нові рішення шляхом комбінування частин від двох або більше "батьківських" рішень. Цей процес сприяє обміну корисними характеристиками між рішеннями та збільшує різноманітність популяції, що є критично важливим для ефективного пошуку оптимальних рішень.

Мутація Мутація вносить випадкові зміни до окремих рішень, запобігаючи прематурній конвергенції популяції до локального максимуму та дозволяючи алгоритму досліджувати нові області простору рішень. Хоча мутації зустрічаються рідко, вони критично важливі для забезпечення генетичної різноманітності в популяції.

Генетичні алгоритми представляють собою унікальний клас оптимізаційних алгоритмів, що наслідують принципи біологічної еволюції, як-от природний відбір та генетична рекомбінація, для вирішення складних задач. Їхня унікальність і потужність полягають у здатності ефективно навігувати по великих та складних просторах пошуку, де традиційні методи можуть зазнати невдачі. Головні переваги генетичних алгоритмів включають їхню високу адаптивність, гнучкість, паралелізм, а також стійкість до локальних оптимумів.

Генетичні алгоритми відзначаються високою адаптивністю, здатністю адаптуватися до змін у задачі або середовищі, що робить їх особливо корисними для динамічних або складних оптимізаційних задач. Ця властивість дозволяє алгоритмам виявляти і експлуатувати патерни в просторі рішень, які можуть не бути відразу очевидними. Гнучкість ГА також є ключовою перевагою; вони можуть бути застосовані до широкого спектру задач без необхідності в суттєвих модифікаціях алгоритму, роблячи їх універсальним інструментом для різноманітних областей, від оптимізації до машинного навчання.

Паралелізм, що вбудований у природу генетичних алгоритмів, дозволяє ефективно використовувати сучасні багатопроцесорні та розподілені обчислювальні системи. Оскільки кожен індивід у популяції може бути оцінений незалежно, ГА природньо підходять для паралельного виконання, що значно зменшує час пошуку рішень для складних задач. Крім того, стійкість до локальних оптимумів є однією з найбільших переваг ГА. Завдяки механізмам, таким як мутація та рекомбінація, вони здатні "вислизати" з локальних максимумів або мінімумів і продовжувати пошук глобальних рішень.

Однак, попри ці переваги, успіх застосування генетичних алгоритмів сильно залежить від якості визначення функції пристосованості та правильного налаштування параметрів алгоритму. Уважне налаштування та використання стратегій збереження різноманітності можуть значно підвищити шанси на успішне вирішення задачі.

Генетичні алгоритми, хоч і є потужним інструментом для вирішення складних оптимізаційних задач, мають декілька недоліків, які можуть впливати на їхню ефективність у певних умовах. Одним із основних викликів є ризик передчасної конвергенції, коли алгоритм зосереджується на локальному оптимумі і втрачає здатність до подальшого дослідження простору пошуку для знаходження глобального оптимуму. Це стає проблемою, коли різноманітність у популяції стає надто обмеженою. Інша проблема полягає у важливості правильного вибору параметрів, включаючи розмір популяції, ймовірності кросоверу та мутації, а також критерії відбору. Неправильний вибір цих параметрів може призвести до повільної конвергенції або навіть зупинки пошуку без знаходження прийняттого рішення.

Генетичні алгоритми також можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо для великих популяцій або при розв'язанні складних задач. Кожне покоління вимагає оцінювання фітнесу всіх індивідів у популяції, що може бути витратним з точки зору обчислень. Випадковість у мутаціях та інших аспектах генетичних алгоритмів допомагає забезпечити різноманітність та дослідження простору пошуку, але також робить результати деякою мірою непередбачуваними. Це може призвести до того, що різні запуски алгоритму на одній і тій же задачі дають різні результати. Нарешті, успіх генетичних алгоритмів сильно залежить від якості функції пристосованості, яка

вимірює, наскільки добре кожне рішення вирішує поставлену задачу. Розробка точної та ефективної функції пристосованості може бути складною, особливо для задач, де важко кількісно оцінити успіх.

Попри ці недоліки, правильне налаштування параметрів, використання стратегій збереження різноманітності, а також комбінування генетичних алгоритмів з іншими методами можуть значно покращити їхню ефективність та зменшити вплив обмежень.

Генетичні алгоритми (ГА) виступають як потужний інструмент у розв'язанні задач планування маршрутів завдяки своїй здатності знаходити оптимальні або близькі до оптимальних рішень у великих просторах пошуку. У своїй статті Y. Volkan Pehlivanoglu та Perihan Pehlivanoglu (2021) надають унікальний погляд на покращення стандартних ГА для задач планування маршрутів БпЛА, впроваджуючи інноваційні підходи для підвищення ефективності та ефективного уникнення перешкод.

Генетичний алгоритм є еволюційним методом оптимізації, який наслідує процеси природного відбору та генетичної еволюції. Він використовує популяцію потенційних рішень для задачі, які еволюціонують через процеси селекції, кросоверу (схрещування) та мутації, спрямовані на знаходження найкращого рішення.

Автори статті впроваджують кілька ключових нововведень у процес генетичного алгоритму, спрямовані на підвищення його ефективності у задачах планування маршрутів БпЛА:

- Покращення початкової популяції: оптимізація мурашиними колоніями для генерації субоптимальних маршрутів, які включаються до початкової популяції ГА, забезпечуючи більш високу якість стартових рішень.

- Інтеграція діаграм Вороного та методів кластеризації: Використання цих методів для ідентифікації ключових точок та маршрутів, які мінімізують ризик зіткнень із перешкодами та оптимізують покриття цільових зон.
- Адаптація до складних середовищ: Розроблені підходи дозволяють алгоритм у більш ефективно адаптуватися до складних середовищ із численними перешкодами, забезпечуючи при цьому високу якість планування маршрутів. Це досягається шляхом вдосконалення механізму оцінки маршрутів, де враховуються не тільки довжина маршруту та енергетична ефективність, але й безпека польоту та здатність до уникнення перешкод.
- Динамічна адаптація маршрутів: Генетичний алгоритм, покращений за допомогою цих інноваційних підходів, здатен динамічно адаптувати маршрути БпЛА у відповідь на зміни у середовищі, такі як з'явлення нових перешкод або зміна цілей місії.
- Оптимізація за багатьма критеріями: Підходи, представлені в статті, демонструють, як генетичний алгоритм може бути налаштований для оптимізації за багатьма критеріями одночасно, включаючи не тільки мінімізацію довжини маршруту, але й максимізацію покриття області та забезпечення безпеки польоту.

Ці нововведення мають значний вплив як на теоретичні дослідження в області планування маршрутів БпЛА, так і на практичне застосування в різноманітних сферах, від моніторингу сільськогосподарських угідь до рятувальних операцій та військових місій. Особливо цінним є той факт, що підходи, розроблені в статті, можуть бути адаптовані для використання у складі рою БпЛА, що відкриває широкі перспективи для дослідження колективної поведінки та координації дій між різними БпЛА.

Підпункт теоретичного розділу наукової роботи, присвячений використанню генетичного алгоритму для планування маршруту БпЛА, висвітлює значний потенціал генетичних алгоритмів у вирішенні складних задач оптимізації, зокрема у контексті автономного планування маршрутів. Інтеграція з іншими оптимізаційними методами та адаптивні стратегії планування роблять генетичні алгоритми особливо привабливими для розв'язання задач, де потрібно враховувати множину параметрів та адаптуватися до змін у середовищі. Такий підхід дозволяє не тільки покращити ефективність виконання місій БпЛА, але й забезпечити вищий рівень безпеки та надійності польотів.

Важливо відзначити, що успіх застосування генетичних алгоритмів залежить від правильної настройки їхніх параметрів, таких як розмір популяції, ймовірності кросоверу та мутації, а також від обраної схеми відбору. Тому детальний аналіз та експериментальна перевірка різних конфігурацій генетичного алгоритму є критично важливими для виявлення найефективніших підходів до планування маршрутів.

Крім того, інтеграція генетичних алгоритмів з передовими технологіями збору даних та штучного інтелекту, такими як машинне навчання та нейронні мережі, може відкрити нові горизонти в автономному плануванні маршрутів та координації дій рою БпЛА. Це дозволить не тільки ефективно адаптуватися до складних умов місії, але й передбачити потенційні перешкоди та зміни у середовищі, підвищуючи ефективність та надійність покриття ділянки.

У заключенні, генетичні алгоритми пропонують міцний фундамент для розробки вдосконалених систем планування маршрутів для БпЛА. Їхня здатність до оптимізації в широкому спектрі сценаріїв робить їх ідеальними для застосування в рої БпЛА, що виконують комплексні задачі покриття ділян-

ки. Подальші дослідження в цій галузі можуть зосередитися на розширенні можливостей генетичних алгоритмів, включаючи їх інтеграцію з іншими методами оптимізації та штучного інтелекту, для подальшого підвищення ефективності та адаптивності автономних систем БпЛА.

1.2.2. Алгоритм рою частинок

Алгоритм роями частинок (Particle Swarm Optimization, PSO) є методом обчислювального інтелекту, який імітує соціальну поведінку тварин, таких як зграї птахів або рибних косяків, і використовується для вирішення різноманітних оптимізаційних задач. PSO втілює ідею, що кожна "частинка" у віртуальному просторі представляє потенційне рішення задачі та "летить" через цей простір, адаптуючись на основі своїх власних найкращих досягнень та досягнень своїх сусідів, оновлюючи своє положення з метою знаходження оптимального рішення. У контексті рою БпЛА, PSO може бути застосований для вирішення задач, таких як планування маршрутів, де алгоритм допомагає знайти оптимальні шляхи для кожного БпЛА, мінімізуючи загальний час польоту та енергоспоживання, а також забезпечуючи ефективне покриття заданої території.

PSO також застосовний для координації дій різних БпЛА в рої, забезпечуючи їх синхронізовану роботу і уникнення потенційних зіткнень, водночас максимізуючи загальну продуктивність рою. Крім того, алгоритм може оптимізувати розподіл завдань серед БпЛА, забезпечуючи, щоб кожен апарат виконував завдання, до яких він найкраще підходить, або ті, які забезпечують найбільш ефективно використання доступних ресурсів рою.

PSO ідеально підходить для застосування в сценаріях з роями БпЛА через свою здатність ефективно знаходити рішення в складних, багатови-

мірних просторах пошуку, а також його адаптивність до динамічних змін в середовищі та завданнях, що робить його особливо корисним для управління поведінкою рою БпЛА в реальному часі.

PSO пропонує ряд значних переваг, які роблять його вельми ефективним для різноманітних задач оптимізації. Однією з ключових переваг PSO є його простота у реалізації порівняно з іншими оптимізаційними алгоритмами. Ця характеристика робить PSO доступним для широкого кола дослідників і практиків, які не мають глибоких знань у галузі оптимізації. Крім того, PSO має здатність до ефективного пошуку глобальних оптимумів у великих та складних просторах пошуку завдяки своїй природній здатності досліджувати простір рішень у широкому діапазоні, що допомагає уникнути застрягання в локальних мінімумах або максимумах.

PSO також демонструє високу ступінь гнучкості, оскільки його можна легко адаптувати до різних типів задач оптимізації без необхідності значних змін у самому алгоритмі. Це робить PSO вельми цінним інструментом у таких різнопланових областях, як машинне навчання, проектування мереж та управління роєм БпЛА. Додатково, паралелізм алгоритму PSO сприяє його високій обчислювальній ефективності, оскільки оцінка кожної частинки (кандидатного рішення) може проводитися незалежно, дозволяючи використовувати потужності сучасних багатоядерних процесорів і обчислювальних кластерів.

Крім того, PSO характеризується відносною простотою налаштування, оскільки основні параметри, які необхідно визначити, обмежуються кількістю частинок в рої та коефіцієнтами швидкості, що контролюють динаміку пошуку. Це контрастує з більш складними налаштуваннями параметрів, ха-

рактерними для інших алгоритмів оптимізації, таких як генетичні алгоритми. Така простота налаштувань робить PSO привабливим вибором для широкого спектра застосувань, зменшуючи час та зусилля, необхідні для розробки ефективних рішень.

В цілому, завдяки своїй простоті, гнучкості, здатності до паралелізму та ефективності пошуку, алгоритм роями частинок є потужним інструментом для вирішення широкого діапазону оптимізаційних задач, включаючи складні задачі, пов'язані з координацією та управлінням роями БпЛА.

Чудовий приклад використання PSO для динамічного планування маршруту використовуючи рій безпілотних літальних апаратів описали у своїй статті Рукс, Lewis та Stark (2021). Їх метод спрямований на покращення ефективності та надійності систем керування БпЛА у невідомих або динамічно змінюваних середовищах.

У статті представлено два основних компоненти: модель керування роєм БпЛА, яка використовує оптимізацію роєм частинок (PSO) для планування маршрутів, та алгоритм мінімізації зіткнень для безпечної взаємодії БпЛА у просторі. Розроблена система планування маршруту, PSOP (Particle Swarm Optimisation Pathfinding), є динамічним та кооперативним алгоритмом, який адаптується до мінливих умов середовища, в той час як модель Drone Flock Control (DFC) забезпечує модульність та гнучкість системи керування.

Основною ідеєю є використання PSO для розробки методу, який дозволяє рою БпЛА динамічно реагувати на перешкоди, змінюючи маршрути в реальному часі для досягнення цілей місії без зіткнень. Це особливо актуально для місій пошуку та рятування, де БпЛА потребують швидкої адаптації до нової інформації про стан середовища.

Для валідації та аналізу ефективності розроблених алгоритмів автори використовують симуляційне середовище, створене за допомогою ігрового двигуна Unity. Симуляції проводилися для різної кількості БпЛА з метою виявлення якості маршрутів, ефективності уникнення перешкод та загальної продуктивності системи у різних сценаріях.

Результати дослідження показують, що використання PSOP значно покращує ефективність планування маршруту порівняно з традиційними методами, забезпечуючи високу якість маршрутів з мінімальною кількістю зіткнень. Ці результати підкреслюють потенціал оптимізації роєм частинок як міцного інструменту для динамічного планування маршрутів у складних середовищах, де рої БпЛА повинні ефективно адаптуватися до непередбачуваних обставин.

Автори також зазначають, що, незважаючи на високу ефективність PSOP у симуляційному середовищі, існують потенційні обмеження та виклики для реалізації цього підходу в реальних умовах. Це включає потребу в додаткових дослідженнях для адаптації алгоритму до змінних факторів навколишнього середовища, таких як вітер або атмосферні збурення, які можуть впливати на поведінку та тривалість маршруту БпЛА.

Майбутні напрямки досліджень, які запропоновані у статті, включають розширення тестування алгоритму в більш різноманітних і реалістичних сценаріях, інтеграцію з іншими методами роєвого інтелекту для подальшого покращення продуктивності та надійності, а також адаптацію моделі для застосування у специфічних областях, наприклад, в аграрному секторі або для місій швидкого реагування.

Попри всі переваги алгоритм рою частинок має декілька недоліків, які

можуть обмежувати його ефективність або застосування в певних областях. Одним із основних викликів при використанні PSO є його схильність до передчасної конвергенції, коли алгоритм швидко збігається до локального оптимуму, не в змозі знайти глобальне оптимальне рішення. Це може статися через недостатню різноманітність у популяції частинок, коли більшість частинок починають слідувати за лідером рою, зменшуючи дослідження простору пошуку.

Інша проблема полягає у визначенні оптимальних значень для параметрів алгоритму, таких як коефіцієнти соціальної та когнітивної складових, а також параметри інерції. Неправильне налаштування цих параметрів може призвести до повільної конвергенції або зациклення алгоритму на неефективних рішеннях.

Крім того, PSO може мати обмежену ефективність у задачах з високою розмірністю або коли цільова функція має складну топологію з багатьма локальними оптимумами. У таких ситуаціях пошук глобального оптимуму стає значно ускладненим, і PSO може вимагати значних обчислювальних ресурсів або спеціалізованих модифікацій для підвищення ефективності пошуку.

Також варто зазначити, що PSO, як і більшість стохастичних алгоритмів, може демонструвати різні результати при кожному запуску через випадковість у процесі пошуку. Це може створити труднощі при відтворенні результатів або порівнянні ефективності алгоритму з іншими методами.

Незважаючи на ці недоліки, PSO залишається важливим інструментом в наборі оптимізаційних технік завдяки його здатності знаходити задовільні рішення в широкому спектрі задач. Подолання зазначених обмежень часто вимагає творчого підходу до налаштування алгоритму, використання гібри-

дних стратегій або спеціалізованих модифікацій, щоб адаптувати PSO до конкретних вимог задачі.

1.2.3. Порівняння

Алгоритм роями частинок (PSO) і генетичні алгоритми (ГА) представляють собою два підходи обчислювального інтелекту, які наслідують природні процеси для розв'язання оптимізаційних задач. PSO вдихновлено соціальною поведінкою тварин, таких як зграї птахів, де кожна частинка представляє потенційне рішення і адаптує своє положення, виходячи з особистого досвіду та досвіду сусідів. Це відрізняється від ГА, які імітують процеси еволюції та природного відбору, працюючи з популяцією рішень, які піддаються вибору, кросоверу та мутації для створення нових поколінь рішень.

Однією з ключових переваг PSO є його простота у реалізації порівняно з ГА, що робить його доступним для широкого кола користувачів, не вимагаючи глибоких знань у галузі оптимізації. PSO також здатний швидко знаходити рішення, що робить його ефективним для деяких задач. З іншого боку, ГА характеризуються високою гнучкістю та здатністю ефективно впровадитися зі складними просторами пошуку, завдяки генетичним операціям, які сприяють різноманітності та дослідженню.

Однак PSO може страждати від проблеми передчасної конвергенції, особливо в мульти модальних або високовимірних просторах пошуку, де алгоритм може швидко "застрягти" в локальному оптимумі. ГА також вимагають уважного налаштування параметрів та можуть бути обчислювально вимогливими через необхідність оцінювати великі популяції і проводити багато поколінь для досягнення конвергенції. Крім того, ГА можуть зіткнутися з проблемами конвергенції в дуже складних просторах пошуку.

Обидва алгоритми виявляються корисними у різних сценаріях, включаючи оптимізацію, проектування, планування та машинне навчання, і вибір між ними залежить від конкретної задачі, доступних обчислювальних ресурсів, а також персональних переваг та досвіду. Однак замість вибору між цими двома підходами є також варіант їх од'єданого використання. У своїй статті Ning Gao та інші (2022) зосереджуються на розробці та аналізі стратегій керування, що дозволяють роюм безпілотних літальних апаратів ефективно покривати задану територію для забезпечення мережі зв'язку. Автори пропонують використання алгоритмів рою частинок та еволюційних алгоритмів для розв'язання проблеми оптимізації покриття, що дозволяє адаптувати поведінку кожного БпЛА з огляду на загальні цілі місії та динамічно змінювані умови середовища. Обговорюються ключові виклики, пов'язані з управлінням роєм БпЛА, включаючи задачі планування маршрутів, координації дій між апаратами та оптимізації покриття території для створення стійкої мережі зв'язку.

Основною метою роботи є розробка методології, яка б дозволила роюм БпЛА самостійно адаптуватися до змін у середовищі та вимогах до мережі зв'язку, тим самим підвищуючи ефективність використання БпЛА в різноманітних сценаріях, від цивільних досліджень до військових та рятувальних операцій.

Стаття також розглядає потенційні переваги використання роїв БпЛА, зокрема збільшення зони покриття мережі зв'язку, підвищення її надійності та зменшення залежності від наземної інфраструктури. Автори акцентують увагу на значному потенціалі подальших досліджень у цій області, з особливим фокусом на розробці адаптивних алгоритмів керування, що можуть

враховувати широкий спектр змінних та непередбачуваних факторів. Вони досліджують використання алгоритму роя частинок та еволюційних алгоритмів для оптимізації покриття території роєм БпЛА з метою ефективного забезпечення мережі зв'язку.

Алгоритм роя частинок застосовується для моделювання колективної поведінки БпЛА з метою виявлення оптимальних позицій в просторі для кожного апарату. В цьому контексті, "частинки" в алгоритмі відповідають окремим БпЛА в рої, кожна з яких "досліджує" простір рішень, адаптуючись на основі персонального досвіду та досвіду своїх "сусідів" в рої. Це дозволяє адаптивно визначати місцеположення кожного БпЛА таким чином, щоб максимізувати покриття території та забезпечити оптимальне функціонування мережі зв'язку.

Еволюційні алгоритми використовуються для ітеративної оптимізації розташування та поведінки БпЛА шляхом відбору найкращих "рішень" через процеси селекції, кросоверу та мутації. Ці алгоритми дозволяють рою БпЛА розвивати стратегії розміщення та переміщення, які враховують не тільки поточні потреби мережі зв'язку, але й можливі зміни в умовах навколишнього середовища або місії. Еволюційний підхід забезпечує гнучкість та адаптивність у прийнятті рішень, дозволяючи рою БпЛА оптимально адаптуватися до динамічних умов.

Автори демонструють, що застосування PSO та еволюційних алгоритмів у комплексі дозволяє значно підвищити ефективність покриття території роєм БпЛА, оптимізуючи як місцеположення кожного апарату, так і загальну роботу мережі зв'язку. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню ефективності виконання місії, зменшенню витрат енергії та покращенню надійності зв'язку.

У висновку стаття акцентується на тому, що розроблені та досліджені методи оптимізації покриття території за допомогою рою БпЛА, зокрема використання алгоритму роя частинок (PSO) та еволюційних алгоритмів, демонструють значний потенціал у покращенні ефективності мереж зв'язку, забезпечені БпЛА. Автори підкреслюють, що ці методи дозволяють динамічно реагувати на зміни в умовах середовища та задачах покриття, що робить їх ефективними інструментами для розширення можливостей мереж зв'язку в різних сценаріях застосування. Особливу увагу приділено підвищенню автономності БпЛА та можливості роя самостійно адаптуватися та оптимізувати свої маршрути та поведінку для досягнення кращого покриття території. Це не тільки покращує покриття та доступність мереж зв'язку, але й сприяє зниженню залежності від людського втручання та зменшенню оперативних витрат.

Автори наголошують на потенціалі подальших досліджень у цій області, вказуючи на необхідність розробки більш складних моделей та алгоритмів, які могли б ще ефективніше вирішувати завдання оптимізації покриття та координації роїв БпЛА. Також зазначається важливість інтеграції цих методів із існуючими та майбутніми системами мереж зв'язку для досягнення найкращих результатів у практичних застосуваннях.

1.3. Покриття території роями БпЛА

1.3.1. Опис та значення

У контексті застосування рою безпілотних літальних апаратів, поняття "покриття території" набуває унікального значення, передбачаючи не лише огляд або моніторинг великих ділянок землі або водних просторів, але й виконання різноманітних завдань, які можуть бути недоступні або вкрай важкі

для людей чи традиційної техніки. Це завдання включає широкий спектр дій від фотографування та відеозйомки для картографування чи нагляду, до більш специфічних, як теплове сканування для виявлення теплових витоків в інфраструктурі, вимірювання рівнів радіації або забруднення у важкодоступних регіонах.

Задача покриття території роєм БпЛА стає особливо важливою у таких сферах, як екологічний моніторинг, де швидкий і точний збір даних про стан довкілля може сприяти вчасному виявленню та реагуванню на екологічні катастрофи. У сільському господарстві, БпЛА можуть забезпечувати детальне картографування угідь, допомагаючи фермерам планувати посіви та виявляти проблемні зони, що потребують додаткового зрошення або обробітку. У сфері пошуку та рятування, швидкість та здатність БпЛА покривати великі території можуть врятувати життя, надаючи критично важливу інформацію рятувальним командам про місцезнаходження людей в зонах катастроф.

Крім цього, завдання покриття території БпЛА має важливе значення в контексті забезпечення безпеки та ефективності виконання місій. Використання рою БпЛА дозволяє не тільки масштабувати зусилля, розподіляючи задачі між декількома апаратами, але й забезпечує вищий рівень адаптивності до змінних умов середовища. Це зменшує ризики для людського життя та здоров'я, оскільки БпЛА можуть виконувати розвідку та збір даних в умовах, які можуть бути небезпечними або недоступними для людей, наприклад, в зонах з високим рівнем радіаційного забруднення, у районах природних катастроф, чи в інших небезпечних середовищах, де присутність людини може призвести до травм або загрози життю.

Більше того, завдання покриття території за допомогою БпЛА сприяє

підвищенню ефективності виконання різноманітних місій завдяки можливості швидкого збору великих об'ємів даних та їх подальшого аналізу. Наприклад, у контексті екологічного моніторингу, БпЛА можуть збирати дані про якість повітря або води, стан рослинності та зміни в ландшафті, дозволяючи науковцям та екологам своєчасно реагувати на екологічні зміни або загрози.

Також завдання покриття території за допомогою БпЛА відіграє важливу роль в картографуванні та плануванні, надаючи точні та актуальні картографічні дані, які можуть бути використані в урбаністичному плануванні, розвитку інфраструктури, а також в наукових дослідженнях. Використання рою БпЛА дозволяє значно прискорити процес збору даних та зменшити витрати порівняно з традиційними методами землемірства та аерофотозйомки.

У підсумку, завдання покриття території за допомогою рою БпЛА не тільки підвищує ефективність та безпеку виконання місій, але й відкриває нові можливості для досліджень, моніторингу та розвитку у багатьох галузях, забезпечуючи актуальність та інноваційність підходів до розв'язання комплексних завдань сучасного світу.

1.3.2. Основні виклики

Використання рою БпЛА для виконання завдань покриття території приносить унікальні виклики, серед яких управління та координація рою відіграє ключову роль. Ефективне керування роєм потребує злагодженої роботи всіх БпЛА, щоб забезпечити охоплення великих територій без зайвих перекриттів чи прогалів. Уникнення перешкод стає критично важливим, оскільки кожен апарат повинен бути здатним вчасно реагувати на появу непередбачуваних об'єктів на своєму шляху, чи то статичних перешкод, таких як будівлі чи дерева, чи рухомих, як інші БпЛА або птахи. Водночас збереження

заданої формації забезпечує оптимальне розподілення апаратів по території, знижуючи ризики зіткнень між ними та покращуючи якість збору даних.

Розподіл завдань між окремими БпЛА є ще одним аспектом, що вимагає уваги. Ефективне покриття великих територій потребує від кожного БпЛА виконання конкретної частини завдання з урахуванням його місцезнаходження, стану заряду батареї та специфіки місії. Врахування цих факторів в алгоритмах управління роєм дозволяє оптимізувати загальну продуктивність та ефективність виконання задачі.

Динамічність середовища додає додаткового рівня складності, оскільки зміни погодних умов, рухомі об'єкти або інші непередбачувані фактори можуть вимагати швидкого адаптування плану місії та маршрутів окремих БпЛА. Це ставить під вимогу розробку алгоритмів, які не тільки ефективно враховують поточний стан середовища, але й мають можливість прогнозувати майбутні зміни та адаптуватися до них, забезпечуючи безперебійне виконання завдань покриття.

Таким чином, управління роєм БпЛА в динамічному середовищі вимагає не тільки ретельного планування та координації між апаратами, але й розробки гнучких алгоритмів, спроможних адаптуватися до постійно мінливих умов. Реалізація таких алгоритмів потребує глибокого розуміння як технічних аспектів роботи БпЛА, так і специфіки середовища, в якому вони виконують завдання. Це, у свою чергу, вимагає не лише використання передових технологій для обробки даних і управління політами, але й розробки спеціалізованого програмного забезпечення, яке здатне оперативно обробляти інформацію від різних датчиків і керувати поведінкою БпЛА в реальному часі.

Забезпечення стабільної комунікації в рої також є важливою задачею, оскільки ефективна координація залежить від обміну інформацією між БпЛА. Розробка надійних і безпечних каналів зв'язку, здатних працювати в умовах високої інтерференції та перешкод, є ключовим фактором успіху для реалізації завдань покриття.

Крім технічних аспектів, існують також виклики, пов'язані з плануванням та виконанням місій, такі як вибір оптимальних маршрутів, планування політів з урахуванням обмежень часу та енергоспоживання, а також забезпечення безпеки політів у складних або небезпечних середовищах.

Усі ці виклики вимагають багаторівневого підходу до вирішення, що включає не тільки розробку технічних рішень, але й глибоке розуміння природних, соціальних і законодавчих аспектів використання БпЛА. Подолання цих викликів відкриє широкі можливості для ефективного використання роїв БпЛА в найрізноманітніших сферах, від моніторингу довкілля та аграрних досліджень до пошуку та рятування та управління надзвичайними ситуаціями.

1.3.3. Методи розв'язання

Розв'язання завдань покриття території за допомогою рою БпЛА вимагає від дослідників і інженерів розробки і впровадження різноманітних алгоритмів планування маршрутів та стратегій координації. Серед методів планування маршруту особливо виділяються еволюційні алгоритми та алгоритми рою часток, кожен з яких пропонує унікальні підходи до визначення оптимальних шляхів польоту для БпЛА для досягнення максимального покриття заданої території. Еволюційні алгоритми використовують принципи природного відбору та генетичної мутації для ітеративного вдосконалення

маршрутів, тоді як алгоритми рою часток відтворюють поведінку природних роїв, таких як зграї птахів або бджолині сім'ї, для знаходження оптимальних шляхів через колективний інтелект.

Разом з цим, стратегії координації відіграють вирішальну роль у ефективному виконанні завдань покриття, забезпечуючи, що кожен БпЛА в рої взаємодіє з іншими для уникнення зіткнень та ефективного розподілу завдань. Координація в рої БпЛА вимагає не лише точного обміну інформацією про місцеположення та стан кожного апарату, але й розробки алгоритмів, здатних швидко реагувати на зміни в динамічному середовищі. Це може включати адаптацію маршрутів у відповідь на появу нових перешкод або зміни в заданих областях покриття, а також динамічний розподіл завдань між апаратами в залежності від їхнього заряду батареї та поточного місцеположення.

Застосування цих алгоритмів та стратегій вимагає глибокого технічного розуміння та знання в галузі автоматизованого планування та штучного інтелекту. Ефективне вирішення завдань покриття території за допомогою рою БпЛА не лише покращує продуктивність місій, але й забезпечує нові можливості для виконання складних завдань в областях моніторингу аграрних досліджень, пошуку та рятування, а також у багатьох інших сферах, де потрібне швидке та ефективне охоплення великих територій. Основний акцент у цих стратегіях лежить на забезпеченні високого рівня автономності БпЛА, дозволяючи їм самостійно приймати рішення на основі зібраної інформації та змін у середовищі, водночас підтримуючи зв'язок із центром управління та іншими апаратами в рої.

Розвиток технологій комунікації та обробки даних грає ключову роль у підвищенні ефективності координації рою БпЛА. Інтеграція передових си-

стем машинного зору, радіолокаційного спостереження та інших датчиків забезпечує БпЛА необхідною інформацією для точного визначення місцеположення, ідентифікації перешкод та оптимізації маршрутів. Також, застосування машинного навчання дозволяє рою БпЛА адаптуватися до нових умов та оптимізувати стратегії поведінки з метою покращення загальної продуктивності завдань покриття.

Незважаючи на значний прогрес у цій області, існують виклики, пов'язані зі забезпеченням безпеки польотів та дотриманням законодавчих вимог. Розвиток нормативної бази та стандартів безпеки для використання роїв БпЛА у цивільному повітряному просторі є важливим аспектом, що потребує подальших досліджень та міжнародної співпраці.

У підсумку, завдання покриття території за допомогою рою БпЛА відкриває нові перспективи для використання безпілотних технологій, пропонуючи ефективні рішення для широкого спектра завдань. Продовження досліджень у цій області, з акцентом на вдосконалення алгоритмів планування маршрутів, стратегій координації та методів обробки даних, має критичне значення для реалізації повного потенціалу роїв БпЛА у майбутньому.

1.4. Масштабування та гетерогенність роїв БпЛА

У сучасному світі БпЛА відіграють все більш важливу роль у широкому спектрі застосувань, від сільського господарства та екологічного моніторингу до військових та рятувальних операцій. Особливий інтерес представляє використання роїв БпЛА, які через координацію дій між апаратами можуть виконувати складні завдання ефективніше, ніж окремий БпЛА. Однак, зі зростанням масштабів місій та розширенням спектра завдань виникає потреба в детальному розгляді двох ключових аспектів: масштабування роїв та їх

гетерогенності.

Маштабування роїв БпЛА вказує на здатність системи збільшувати або зменшувати кількість апаратів в залежності від потреб місії, тим самим адаптуючись до різноманітних завдань та умов. Це включає здатність системи забезпечувати високий рівень координації та управління при зміні кількості БпЛА, що є критичним для забезпечення ефективного виконання завдань.

Гетерогенність роїв БпЛА описує використання апаратів з різними характеристиками та можливостями в рамках одного рою. Це дозволяє рою адаптуватися до різних типів завдань, використовуючи "спеціалізовані" БпЛА для конкретних цілей, що підвищує загальну ефективність та гнучкість системи.

Цей розділ присвячений аналізу викликів та можливостей, пов'язаних з маштабуванням та гетерогенністю роїв БпЛА, розглядаючи як теоретичні основи, так і практичні аспекти їх використання. Ми детально розглянемо, як ці два аспекти впливають на планування та виконання місій, особливо у контексті оптимізації покриття території.

1.4.1. Основи маштабування роїв БпЛА

Маштабування роїв БпЛА є ключовим аспектом у розширенні можливостей та гнучкості безпілотних систем при виконанні широкого спектру місій. Здатність збільшувати або зменшувати кількість апаратів у рої дозволяє адаптуватися до змінних умов та вимог завдання, оптимізуючи при цьому ресурси та ефективність.

Збільшення кількості БпЛА в рої дозволяє охопити більші території за короткий час, підвищуючи загальну ефективність місії. Це особливо актуально для завдань, що вимагають широкомасштабного моніторингу або швидко-

го реагування, наприклад, у сфері екологічного моніторингу або у випадках надзвичайних ситуацій. Водночас, масштабування рою передбачає забезпечення достатнього рівня координації та взаємодії між БпЛА, щоб уникнути зіткнень та забезпечити одночасне виконання різних завдань.

Однак це також створює додаткові виклики, зокрема пов'язані з координацією дій між апаратами. Зі збільшенням кількості БпЛА зростає складність управління роєм, вимагаючи від алгоритмів управління більшої точності та швидкодії. Це включає потребу в розробці більш складних алгоритмів для визначення маршрутів та розподілу завдань, а також забезпечення надійного обміну даними між апаратами в умовах можливих збоїв або перешкод у зв'язку.

Водночас, масштабування роїв БпЛА відкриває нові можливості для покращення надійності місій. Використання більшої кількості БпЛА може забезпечити більшу стійкість до відмов окремих апаратів, дозволяючи рою продовжувати виконання місії навіть у випадку виходу з ладу декількох БпЛА. Масштабування представляє собою потужний інструмент для підвищення ефективності та надійності виконання завдань, але водночас вимагає ретельної уваги до розробки алгоритмів управління, координації дій та обміну даними. Подальше дослідження в цій області може привести до вдосконалення методів керування роями БпЛА, розширюючи їх можливості та сфери застосування.

1.4.2. Гетерогенність роїв БпЛА

В контексті оптимізації покриття території за допомогою роїв БпЛА, гетерогенність відіграє ключову роль, пропонуючи унікальні можливості для підвищення гнучкості та ефективності виконання завдань. Гетерогенність

рою полягає в використанні БпЛА різних типів і конфігурацій, кожен з яких має свої особливі функціональні можливості, характеристики та спеціалізації. Такий підхід дозволяє ефективно розподіляти завдання між апаратами в залежності від їхньої придатності для конкретних місій, оптимізуючи загальну продуктивність та досягнення мети.

Інтеграція БпЛА з різними характеристиками та сенсорними системами в один рій дозволяє виконувати більш складні та різноманітні завдання. Наприклад, дрони з високою автономністю польоту можуть виконувати завдання далекого радіуса дії, тоді як БпЛА з розширеними фотографічними та відео можливостями можуть забезпечувати детальний збір даних на інтересуючих ділянках. Розподіл завдань в гетерогенному рої вимагає врахування специфічних характеристик та можливостей кожного БпЛА. Це забезпечує оптимальне використання ресурсів рою, дозволяючи кожному апарату виконувати завдання, для яких він найбільш підходить. Такий підхід не тільки підвищує загальну ефективність місії, але й зменшує ризики та витрати.

Втім, гетерогенність також вносить додаткові виклики, зокрема щодо координації та управління роєм. Взаємодія між різними типами БпЛА вимагає складних комунікаційних протоколів і алгоритмів управління, здатних забезпечити синхронізацію дій і обмін даними в реальному часі. Також важливим є врахування можливих конфліктів у завданнях і маршрутах, що вимагає вдосконаленої логіки планування та прийняття рішень.

Гетерогенність роїв БпЛА відкриває нові горизонти для підвищення гнучкості та адаптивності в оптимізації покриття території. Розуміння та ефективне управління цією гетерогенністю дозволить реалізувати повний потенціал роїв БпЛА у вирішенні різноманітних задач, відкриваючи широкі мо-

жливості для інноваційних застосувань у майбутньому.

1.4.3. Виклики масштабування та гетерогенності

Масштабування та гетерогенність роїв БпЛА відкривають нові можливості для підвищення ефективності та адаптивності при виконанні завдань покриття території. Проте, ці ж аспекти вносять в процес управління роєм певні виклики, які потребують уваги та спеціального підходу до вирішення.

Одним з основних викликів при масштабуванні рою є забезпечення ефективною комунікації між збільшеною кількістю БпЛА. При зростанні розмірів рою виникає потреба в більш складних механізмах комунікації, що здатні забезпечити швидкий та надійний обмін даними. Це включає не тільки команди управління, але й обмін інформацією про стан та позиції кожного апарату. Гетерогенність рою додає додаткову складність, оскільки різні типи БпЛА можуть мати різні комунікаційні можливості та протоколи.

Енергетична ефективність є критичним аспектом для тривалого функціонування рою БпЛА, особливо при збільшенні кількості апаратів. Масштабування рою вимагає від системи управління оптимізації використання енергії кожного БпЛА для забезпечення максимальної продуктивності та тривалості місії. Гетерогенні рої стикаються з додатковими труднощами у координації енергоспоживання, оскільки різні типи БпЛА можуть мати значні відмінності в батареях, споживанні та витривалості.

Масштабування та гетерогенність роїв також збільшують складність планування та виконання місій. Розробка ефективних алгоритмів, які можуть адаптуватися до змінних умов та оптимізувати задачі серед різноманітних БпЛА, вимагає значних зусиль в дослідженнях та розробці. Планування місій має враховувати не тільки цілі завдання, але й особливості кожного БпЛА,

потреби в комунікації та стратегії уникнення зіткнень, що ускладнює процес управління роєм.

Хоча масштабування та гетерогенність роїв БпЛА відкривають перед використанням безпілотних систем нові можливості, вони також ставлять перед дослідниками та розробниками низку складних викликів. Вирішення цих викликів вимагає комплексного підходу до розробки алгоритмів управління, комунікаційних протоколів та стратегій планування, що буде сприяти підвищенню ефективності, надійності та гнучкості майбутніх місій роїв БпЛА.

1.4.4. Переваги масштабування та гетерогенності для різних застосувань

Масштабування та гетерогенність роїв БпЛА є двома фундаментальними концепціями, що відкривають нові горизонти для застосування безпілотних систем. Ці характеристики надають роям БпЛА унікальні можливості для адаптації до різноманітних місій та середовищ, підвищуючи їх гнучкість, ефективність та функціональність.

В сценаріях, де потрібно провести детальне дослідження великих територій або складних об'єктів, масштабування дозволяє залучити більшу кількість БпЛА для збору даних з високою роздільною здатністю за короткий час. Гетерогенність, у свою чергу, дозволяє використовувати спеціалізовані БпЛА для різних аспектів дослідження: наприклад, деякі БпЛА можуть бути оснащені датчиками для збору хімічних зразків, тоді як інші зосереджуються на відео- та фотодокументації.

У сфері оперативного моніторингу, наприклад, для спостереження за лісовими пожежами або забрудненням водойм, масштабування та гетерогенність роїв БпЛА значно підвищують ефективність місій. Збільшення кілько-

сті БпЛА дозволяє швидше виявляти та відстежувати зміни, тоді як використання апаратів з різними типами датчиків сприяє отриманню більш повної інформації про моніторингові об'єкти.

У рятувальних операціях, де кожна секунда на рахунок, масштабування роїв БпЛА може бути життєво важливим. Залучення великої кількості БпЛА дозволяє швидко оглянути великі території у пошуках постраждалих. Гетерогенність, у свою чергу, дозволяє одночасно виконувати декілька завдань: деякі БпЛА можуть вести пошук людей, тоді як інші займаються картографуванням місцевості або доставляють невеликі вантажі першої допомоги.

Масштабування та гетерогенність роїв БпЛА відкривають нові перспективи для розширення можливостей безпілотних систем у різноманітних сферах застосування. Ці характеристики не лише підвищують ефективність та гнучкість виконання завдань, але й забезпечують високий рівень адаптивності до змінних умов та потреб. Використання масштабованих та гетерогенних роїв БпЛА має потенціал революціонізувати підходи до виконання складних місій, відкриваючи нові можливості для інновацій та розвитку.

1.5. Висновки до розділу

Висновки, отримані в результаті аналізу завдання покриття території за допомогою рою БпЛА, демонструють значний потенціал роїв БпЛА у вирішенні широкого спектру завдань, від моніторингу та картографування до пошуку та рятування. Використання роїв БпЛА дозволяє значно підвищити ефективність та охоплення під час виконання завдань покриття великих територій, надаючи можливість збирати детальну інформацію з важкодоступних місць та в умовах обмеженої видимості.

Серед основних викликів, які були виявлені в ході аналізу, варто виділи-

ти проблеми координації та управління роєм, потребу в ефективних алгоритмах уникнення перешкод, забезпечення стабільної комунікації між апаратами, а також адаптацію до динамічних змін середовища. Ці виклики потребують комплексного підходу до розробки алгоритмів управління та планування маршрутів, а також вдосконалення технологій збору та обробки даних.

Водночас, розробка та застосування нових технологій, таких як машинне навчання, штучний інтелект, та розвиток передових систем комунікації, відкриває нові можливості для подолання існуючих обмежень та підвищення ефективності використання роїв БпЛА у завданнях покриття території. Це включає розробку більш гнучких та адаптивних алгоритмів планування маршруту, які можуть ефективно реагувати на зміни в середовищі та забезпечувати оптимальне покриття з мінімальними ризиками для БпЛА.

Майбутній розвиток в цій галузі також передбачає подальше вдосконалення стратегій координації та управління роєм, включаючи розробку механізмів для ефективного обміну інформацією та координації дій між БпЛА в реальному часі. Крім того, акцент на розвитку безпечних та надійних систем комунікації стане вирішальним для забезпечення стабільності та ефективності роботи роїв БпЛА в складних умовах.

У підсумку, підведення підсумків аналізу завдань покриття території за допомогою рою БпЛА підкреслює значний потенціал цих технологій для революційних змін у багатьох сферах, від екологічного моніторингу до екстрених рятувальних операцій. Однак, для реалізації цього потенціалу необхідно вирішити низку технічних та організаційних викликів, що включає покращення методів координації та управління роєм, розвиток алгоритмів уникнення перешкод та адаптації до змін середовища, а також забезпечення безпеки та

надійності польотів.

Особливу увагу варто приділити розробці міждисциплінарних підходів, що об'єднують знання з різних галузей, таких як штучний інтелект, автоматизація, робототехніка, географічна інформаційна система та інші. Такий підхід дозволить розробити більш ефективні системи, здатні адаптуватися та реагувати на складні та непередбачувані умови реального світу.

Важливим аспектом розвитку використання рою БпЛА є також робота над стандартизацією та регулюванням використання цих технологій, особливо з огляду на питання безпеки, приватності та захисту даних. Розробка міжнародних стандартів та директив дозволить забезпечити безпеку та ефективність використання роїв БпЛА, стимулюючи їх ширше впровадження в комерційних та дослідницьких цілях.

У підсумку, завдання покриття території за допомогою рою БпЛА відкриває широкі перспективи для інновацій та покращення ефективності у багатьох областях. Продовження досліджень, розвиток нових технологій та розробка ефективних стратегій управління і координації стануть ключовими факторами успіху в цьому напрямку, забезпечуючи подальший розвиток та впровадження безпілотних технологій у повсякденне життя.

РОЗДІЛ 2

Методологія дослідження алгоритму покриття території

У цьому розділі представлено методологічні підходи, які використовуються для дослідження та розробки ефективних алгоритмів покриття території роєм дронів. Методологія включає комплексну структуру, що охоплює етапи моделювання, симуляції та експериментальної перевірки алгоритмів. Основною метою цього розділу є забезпечення чіткого опису процесів і методів, які були застосовані для досягнення результатів дослідження.

Розділ починається з обґрунтування вибору методології, включаючи аналіз альтернативних підходів і пояснення переваг обраного методу. Далі детально описуються етапи дослідження, починаючи від розробки математичних моделей і закінчуючи проведенням експериментів у симуляційному середовищі.

Особлива увага приділяється застосуванню еволюційних алгоритмів для оптимізації маршрутів дронів, а також використанню кількісних і якісних критеріїв для оцінки ефективності розроблених алгоритмів. На завершення розглядаються методи порівняння алгоритмів і аналізу результатів, що дозволяє визначити найкращі рішення для реальних сценаріїв покриття території.

Таким чином, цей розділ забезпечує повне розуміння процесу дослідження і створює основу для інтерпретації отриманих результатів у контексті поставлених задач.

2.1. Обґрунтування вибору методології

Методологія, обрана для даного дослідження, базується на поєднанні еволюційних алгоритмів, математичного моделювання та експериментальної перевірки, що дозволяє комплексно вирішувати задачі покриття території

роєм дронів. Такий підхід обґрунтований декількома факторами.

По-перше, проблема оптимального покриття території великою кількістю дронів є складною багатозадачною проблемою, яка включає безліч змінних і параметрів. Використання еволюційних алгоритмів, зокрема генетичних алгоритмів, дозволяє ефективно вирішувати такі задачі шляхом пошуку оптимальних рішень у великому просторі можливих конфігурацій. Цей підхід забезпечує гнучкість і здатність адаптуватися до різних умов, що робить його придатним для дослідження в рамках даної роботи.

По-друге, математичне моделювання дозволяє формалізувати процеси, що досліджуються, і забезпечує точність у визначенні параметрів та оцінці результатів. Геометричне та тригонометричне моделювання забезпечують чітке визначення маршрутів для дронів, а також дозволяють виявляти і мінімізувати можливі помилки в процесі покриття території.

По-третє, експериментальна перевірка в симуляційному середовищі є необхідним етапом для оцінки ефективності розроблених алгоритмів в умовах, що наближені до реальних. Симуляції дозволяють тестувати алгоритми на різних типах територій і з різними конфігураціями рою, що дає можливість виявляти слабкі місця та оптимізувати алгоритми перед їх застосуванням у реальних умовах.

Об'єднання цих методів дозволяє не лише розробити ефективні алгоритми покриття території, але й забезпечити їхню адаптивність і надійність у різних сценаріях застосування. Такий комплексний підхід є найбільш придатним для досягнення цілей даного дослідження і дозволяє отримати достовірні та практично значущі результати.

2.1.1. Огляд альтернативних методологій

У процесі планування дослідження було розглянуто декілька альтернативних методологій, які потенційно могли бути застосовані для вирішення задачі покриття території роєм дронів. Серед них можна виділити традиційні методи оптимізації, такі як лінійне програмування, евристичні підходи, а також методи моделювання та симуляції без використання еволюційних алгоритмів.

Лінійне програмування є потужним інструментом для оптимізації, який дозволяє знаходити оптимальні рішення в задачах з лінійними обмеженнями. Однак, застосування цього методу до задачі покриття території роєм дронів виявляється обмеженим через складність моделювання нелінійних взаємодій між дронами, а також через велику кількість змінних, які важко включити в лінійну модель.

Евристичні методи, такі як жадібні алгоритми або алгоритми локального пошуку, можуть бути використані для швидкого отримання наближених рішень. Вони забезпечують прийнятні результати в задачах з великою кількістю можливих рішень, проте вони часто не гарантують знаходження глобально оптимального рішення і можуть бути неефективними в умовах складної геометрії території та різнотипних дронів.

Методи моделювання без використання еволюційних алгоритмів, такі як дискретні симуляції або прості алгоритми покриття, також були розглянуті. Ці методи можуть бути корисними для моделювання простих сценаріїв, але вони не забезпечують необхідної гнучкості та адаптивності, коли справа доходить до складних задач покриття території з різними обмеженнями і вимогами.

Натомість, еволюційні алгоритми, зокрема генетичні алгоритми, забезпечують баланс між точністю і гнучкістю, що робить їх оптимальним вибором для цього дослідження. Вони дозволяють ефективно знаходити рішення в складних просторах пошуку, адаптуватися до змінних умов і враховувати нелінійні взаємодії між елементами рою дронів. Крім того, застосування генетичних алгоритмів забезпечує можливість легко інтегрувати додаткові критерії оптимізації, такі як енергоспоживання або час покриття, що є критично важливими для практичного застосування розроблених алгоритмів.

Таким чином, вибір еволюційних алгоритмів як основного методу оптимізації в поєднанні з математичним моделюванням та експериментальною перевіркою в симуляційному середовищі дозволяє досягти максимальної ефективності та надійності розроблених рішень. Це підвищує практичну цінність результатів дослідження та забезпечує їхню адаптивність до різних сценаріїв використання в реальних умовах.

2.2. Ключові етапи дослідження

Для успішного досягнення цілей даного дослідження було виділено кілька ключових етапів, які забезпечують поступовий і систематичний підхід до розробки, тестування та аналізу алгоритмів покриття території роєм дронів. Ці етапи є критичними для комплексного вирішення поставлених задач і включають наступні кроки:

2.2.1. Розробка алгоритму

Першим етапом дослідження є розробка ефективного алгоритму покриття території. Цей етап включає формалізацію задачі, визначення основних критеріїв і обмежень, а також розробку математичних моделей, які описують

процес покриття території. В рамках цього етапу були застосовані еволюційні алгоритми, зокрема генетичні алгоритми, для оптимізації маршрутів дронів і забезпечення ефективного покриття території з мінімальними витратами ресурсів. Також було розроблено кілька варіантів алгоритмів для різних сценаріїв, зокрема для територій простої та складної геометрії, а також для роїв з різними типами дронів.

2.2.2. Тестування алгоритму

Після розробки алгоритму наступним важливим етапом є його тестування. Тестування проводилося в симуляційному середовищі, що дозволяє моделювати різні сценарії покриття території, включаючи змінні геометричні параметри та конфігурації рою дронів. Основними метриками для тестування алгоритму стали час покриття території, кількість розворотів дронів, ефективність використання енергії, а також відсоток площі, що була фактично покрита. Симуляційне середовище дозволило оцінити роботу алгоритму в різних умовах і виявити можливі слабкі місця, які потребують доопрацювання.

2.2.3. Аналіз результатів

Після тестування алгоритму було проведено детальний аналіз отриманих результатів. Аналіз включав порівняння результатів для різних варіантів алгоритмів і сценаріїв, а також оцінку їх відповідності встановленим критеріям ефективності. Окремо аналізувалися кількісні показники, такі як час покриття та споживання енергії, а також якісні аспекти, такі як стабільність роботи алгоритму і його здатність адаптуватися до змінних умов. Результати аналізу використовувалися для коригування та вдосконалення алгоритмів,

а також для визначення найефективніших підходів до покриття території в різних умовах.

Загалом, кожен з цих етапів є невід'ємною частиною дослідження і сприяє досягненню кінцевої мети — розробці та впровадженню ефективних алгоритмів покриття території роєм дронів, здатних працювати в різних умовах і забезпечувати високу якість виконання завдань.

2.3. Якісні характеристики дослідження

У рамках даного дослідження були визначені та застосовані кілька ключових якісних характеристик, що дозволяють оцінити ефективність та адаптивність розроблених алгоритмів покриття території роєм дронів. Ці характеристики забезпечують комплексне розуміння здатності алгоритмів працювати в різних умовах і з різними типами дронів.

2.3.1. Гнучкість алгоритму

Гнучкість алгоритму полягає в його здатності ефективно працювати з різними типами дронів і на територіях різної складності. Це включає можливість адаптуватися до дронів з різними характеристиками, такими як розмір, швидкість, запас енергії тощо. Гнучкість алгоритму дозволяє його застосування в широкому спектрі завдань, що забезпечує його універсальність.

2.3.2. Масштабованість алгоритму

Масштабованість алгоритму визначається його здатністю забезпечувати ефективне покриття території при збільшенні або зменшенні розміру рою. Це є важливим аспектом, оскільки різні задачі можуть вимагати різної кількості дронів, і алгоритм повинен залишатися ефективним у будь-якій конфігурації. Масштабованість також включає здатність алгоритму підтримувати стабіль-

ну продуктивність при різних розмірах територій.

2.4. Кількісні характеристики дослідження

У процесі дослідження основну увагу було приділено двом ключовим кількісним характеристикам: збільшенню покриття території та мінімізації перекриттів між дронами.

2.4.1. Збільшення покриття території

Однією з основних кількісних характеристик дослідження є відсоток території, яку вдалося покрити роєм дронів. Ефективність алгоритму визначається тим, наскільки повно він здатний покрити задану територію, уникаючи пропусків і невикористаних зон. Збільшення покриття території означає максимізацію площі, яка охоплюється дронами за мінімальний час. Для цього в алгоритмі використовуються оптимізаційні підходи, які дозволяють рівномірно розподіляти дронів по секторах і враховувати їхні індивідуальні можливості покриття.

2.4.2. Мінімізація перекриттів між дронами

Іншою важливою кількісною характеристикою є мінімізація перекриттів між дронами під час виконання місії. Перекриття виникають, коли кілька дронів одночасно покривають одну й ту ж ділянку території, що призводить до неефективного використання ресурсів та зростання витрат енергії. Метою дослідження є зменшення таких перекриттів до мінімуму, що дозволяє дронам зосередитися на окремих секторах і уникати зайвих витрат часу та енергії. Для досягнення цього, алгоритм оптимізує маршрути дронів, забезпечуючи рівномірний розподіл території без накладання маршрутів.

Таким чином, дослідження зосереджується на балансуванні між макси-

мальним покриттям території та мінімізацією небажаних перекриттів, що є критично важливими показниками ефективності роботи рою дронів.

2.4.3. Відповідність розмірів секторів можливостям дронів

Однією з важливих кількісних характеристик є відповідність розмірів кожного сектору території можливостям дрона, який його покриває. Ця характеристика визначає, наскільки ефективно алгоритм розподіляє сектори з урахуванням радіусу покриття, енергетичних ресурсів та інших параметрів дронів.

Оптимальний розподіл секторів дозволяє мінімізувати витрати енергії та часу на покриття, забезпечуючи, щоб кожен дрон отримав сектор, відповідний його можливостям. Недооцінка або переоцінка розміру сектора може призвести до неефективного використання ресурсів дрона, а також до збільшення часу виконання місії. Тому аналіз цієї характеристики є важливим для оцінки загальної ефективності алгоритму покриття території.

2.5. Висновок до розділу

У цьому розділі було детально описано методологічні підходи, використані для розробки, тестування та оцінки алгоритмів покриття території роєм дронів. Обраний комплексний підхід, який включає еволюційні алгоритми, математичне моделювання, симуляції та експериментальні перевірки, забезпечує високу ефективність і адаптивність розроблених рішень. Методологія дослідження дозволила не лише розробити алгоритми, здатні ефективно виконувати поставлені завдання, але й забезпечити їхню надійність і гнучкість у різних умовах.

Застосування цих якісних та кількісних характеристик для оцінки ефе-

ктивності алгоритмів забезпечує комплексний аналіз результатів, що дозволяє виявити як сильні сторони, так і можливі недоліки розроблених підходів. Враховуючи стабільність, адаптивність, гнучкість, масштабованість обраний методологічний підхід є оптимальним для досягнення цілей дослідження.

Отже, розділ "Методологія" закладає основу для подальшого аналізу та інтерпретації результатів, забезпечуючи чітке розуміння процесу розробки та тестування алгоритмів покриття території роєм дронів.

РОЗДІЛ 3

Розробка алгоритму покриття території роєм БпЛА

У цьому розділі ми детально розглянемо процес розробки та адаптації алгоритмів для оптимізації покриття території за допомогою рою безпілотних літальних апаратів. Основна увага буде приділена генетичним алгоритмам та іншим методам оптимізації, які дозволяють ефективно вирішувати завдання покриття великих та складних територій.

Розробка ефективних алгоритмів управління роєм БпЛА є критично важливим елементом нашого дослідження, оскільки саме ці алгоритми визначають здатність рою адаптуватися до змінних умов середовища, уникати перешкод та забезпечувати максимальне покриття території. Генетичні алгоритми, натхненні принципами природного відбору та еволюції, пропонують потужний інструмент для пошуку оптимальних рішень у складних пошукових просторах. Крім того, ми розглянемо використання інших методів оптимізації, таких як алгоритми рою часток (PSO) та методи машинного навчання, для подальшого підвищення ефективності та адаптивності рою.

Розробка алгоритму планується розбити на три етапи:

- Визначення початкового положення кожного дрона: На першому етапі ми визначаємо оптимальне початкове розташування кожного дрона для забезпечення найкращого покриття території. Це передбачає використання методів оптимізації для мінімізації перекриттів та максимізації охоплення, забезпечуючи, щоб кожен дрон починав з позиції, яка найкраще відповідає загальній стратегії покриття.
- Розподіл території на сектори під кожен дрон: На другому етапі, виходячи з початкового положення дронів, ми розділяємо територію на се-

ктори, кожен з яких буде відповідати за конкретний дрон. Це забезпечує ефективний розподіл роботи між апаратами, зменшуючи ймовірність перекриття маршрутів та оптимізуючи час виконання завдання.

- Знаходження маршруту для покриття території: На третьому етапі ми розробляємо алгоритми для знаходження оптимального маршруту, за яким кожен дрон буде покривати свою частину території. Цей етап включає використання алгоритмів пошуку шляху та методів оптимізації, щоб забезпечити мінімізацію часу польоту та витрати енергії, а також максимально точно покриття заданої території.

Цей розділ надасть глибоке розуміння процесу розробки та адаптації алгоритмів, починаючи з формулювання проблеми та визначення критеріїв оптимізації, до тестування та валідації розроблених рішень. Ми також обговоримо специфічні виклики, пов'язані із застосуванням цих алгоритмів до рою БПЛА, включаючи питання масштабування, гетерогенності та координації дій між апаратами.

Метою цього розділу є представити методологічний підхід до розробки та впровадження алгоритмів оптимізації, які дозволяють рою БПЛА ефективно виконувати завдання покриття території, забезпечуючи при цьому високу точність, надійність та оперативність. Розглянуті методи та стратегії слугуватимуть основою для подальших експериментів та аналізу, що будуть представлені у наступних розділах роботи.

3.1. Визначення початкового положення кожного дрона

Важливим етапом в оптимізації покриття території роєм БПЛА є визначення початкового положення кожного дрона. Це дозволяє забезпечити ефективне охоплення території з самого початку місії, мінімізуючи перекриття

та максимізуючи використання ресурсів. Для вирішення цієї задачі ми розробили генетичний алгоритм (ГА), який дозволяє знайти оптимальні стартові позиції для всіх дронів в рої.

Генетичний алгоритм, натхненний принципами природного відбору та еволюції, складається з кількох основних етапів: створення функції якості (fitness), відбір популяції (selection), кросовер та мутація. У цьому підрозділі ми детально розглянемо кожен з цих етапів у контексті нашого завдання.

- Створення функції якості (fitness): Першим кроком є розробка функції якості, яка оцінює, наскільки добре певна конфігурація початкових положень дронів відповідає поставленим цілям. Ця функція враховує такі фактори, як максимізація покриття території, мінімізація перекриттів між зонами покриття окремих дронів, а також ефективне використання енергетичних ресурсів.
- Відбір популяції (selection): Наступним кроком є відбір найкращих рішень з поточної популяції для створення нових поколінь. Ми використовуємо різні методи відбору, такі як турнірний відбір або відбір за рівнем відповідності, щоб забезпечити збереження найефективніших конфігурацій та їх подальшу еволюцію.
- Кросовер: Після відбору популяції відбувається кросовер, під час якого комбінуються пари конфігурацій для створення нових рішень. Це дозволяє об'єднати найкращі характеристики різних конфігурацій, створюючи нові, потенційно більш ефективні стартові позиції для дронів.
- Мутація: Останнім етапом є мутація, яка вводить випадкові зміни до деяких конфігурацій, забезпечуючи різноманітність популяції та уникнення застою в локальних оптимумах. Мутації можуть включати невеликі зміни

у початкових положеннях дронів, що дозволяє алгоритму досліджувати ширший простір рішень.

У цьому підрозділі ми надамо детальний опис кожного з цих етапів, пояснюючи, як вони інтегруються у наш генетичний алгоритм для визначення початкового положення кожного дрона. Це забезпечить глибоке розуміння процесу розробки та адаптації ГА для вирішення задачі покриття території, надаючи ефективні та інноваційні рішення для управління роєм БПЛА.

3.1.1. Створення функції якості

Функція якості є одним з ключових елементів генетичного алгоритму (ГА), оскільки вона визначає ефективність певної конфігурації початкових положень дронів щодо досягнення поставлених цілей покриття території. У нашому дослідженні функція якості враховує два основних фактори: максимізацію покриття території та мінімізацію перекриттів між зонами покриття окремих дронів.

Для забезпечення ефективного покриття території важливо, щоб дрони були розташовані таким чином, щоб охопити якомога більшу площу з мінімальними перекриттями. У нашій функції якості максимізація покриття території визначається нормальним розподілом позицій дронів від центроїда заданої території. Це означає, що чим рівномірніше розподілені дрони навколо центру, тим краще їх розташування. Для цього розраховується стандартне відхилення відстаней кожного дрона до центроїда території, і чим менше це відхилення, тим кращим вважається розташування дронів для забезпечення рівномірного покриття.

Нехай (C_x, C_y) — координати центроїда території, а (x_i, y_i) — координати кожного дрона. Відстань кожного дрона до центроїда обчислюється як:

$$D_i = \sqrt{(x_i - C_x)^2 + (y_i - C_y)^2} \quad (3.1)$$

Стандартне відхилення відстаней до центроїда визначається як:

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} \quad (3.2)$$

де \bar{D} — середнє значення відстаней:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (3.3)$$

Другим важливим фактором є мінімізація перекриттів між зонами покриття окремих дронів. Це дозволяє уникнути дублювання покриття і, таким чином, забезпечити ефективніше використання ресурсів рою. Територія покриття кожного дрона вважається колом з відповідним радіусом. Мінімізація перекриттів визначається підрахунком суми площ перетинів зон покриття кожного дрона з іншими. Чим менша ця сума, тим ефективніше розташування дронів.

Нехай (x_1, y_1) та (x_2, y_2) — координати центрів двох кіл з радіусами r_1 та r_2 відповідно. Функція для обчислення площі перетину цих двох кіл може бути визначена як:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.4)$$

де d — відстань між центрами кіл.

- Якщо $d \geq r_1 + r_2$, то кола не перетинаються, і площа перетину дорівнює нулю.

- Якщо $d \leq |r_1 - r_2|$, одне коло повністю знаходиться всередині іншого, і площа перетину дорівнює площі меншого кола: σ_D

$$A = \pi \cdot \min(r_1^2, r_2^2) \quad (3.5)$$

- Якщо d знаходиться між цими значеннями, площа перетину обчислюється за формулою:

$$A = r_1^2 \cdot \arccos\left(\frac{d^2 + r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot d \cdot r_1}\right) + r_2^2 \cdot \arccos\left(\frac{d^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot d \cdot r_2}\right) - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(-d + r_1 + r_2) \cdot (d + r_1 - r_2) \cdot (d - r_1 + r_2) \cdot (d + r_1 + r_2)} \quad (3.6)$$

Загальна функція якості визначає ефективність розташування дронів у рої, враховуючи ці два ключові аспекти: рівномірність розподілу дронів та мінімізацію перекриття зон покриття. Менше значення функції свідчить про кращий результат. Вагові коефіцієнти дозволяють регулювати важливість цих критеріїв, а кінцеве значення функції якості відображає баланс між рівномірністю покриття та уникненням дублювання зон покриття.

$$F = w_1 \cdot \sigma_D + w_2 \cdot S \quad (3.7)$$

де:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{ij} \quad (3.8)$$

де A_{ij} — площа перетину зон покриття дронів i та j , обчислена за формулою для площі перетину двох кіл.

Ця функція якості є критичним елементом у процесі оптимізації початкових положень дронів, оскільки вона дозволяє генетичному алгоритму ідентифікувати найбільш ефективні конфігурації, що забезпечують максимальне покриття території з мінімальними перекриттями. У наступних підрозділах ми детально розглянемо інші етапи генетичного алгоритму, включаючи відбір популяції, кросовер та мутацію, які сприяють еволюції конфігурацій до оптимальних рішень.

3.1.2. Відбір популяції

Відбір є одним з ключових етапів генетичного алгоритму (ГА), оскільки він забезпечує еволюцію популяції шляхом збереження найкращих рішень та створення нових на основі успадкування найкращих характеристик. У контексті нашого дослідження, де найменшою одиницею даних (геном) є набір дронів, що покривають певну територію, а популяція – це ряд таких наборів, відбір відіграє важливу роль у визначенні оптимального розташування дронів для максимально ефективного покриття території.

На початку кожного покоління генетичного алгоритму всі набори розташування дронів у популяції випадково генеруються або успадковуються з попереднього покоління. Кожен набір розташування оцінюється за допомогою функції якості, яка розраховує відношення сумарної площі перетинів зон покриття до нормального розподілу відстаней дронів від центроїда території. Оцінки функції якості використовуються для ранжування наборів розташування, де кращі набори мають нижче значення функції якості.

Метод відбору, який ми використовуємо, є турнірним відбором. У цьому методі випадково обираються групи наборів розташування (турніри), і з кожної групи обирається найкращий набір. Цей процес повторюється до тих пір,

поки не буде відібрано достатню кількість наборів для створення нової популяції. Перевага турнірного відбору полягає в тому, що він забезпечує високу ймовірність відбору найкращих наборів, але також дає шанс на виживання менш ефективним наборам, що сприяє генетичній різноманітності.

Таким чином, процес відбору генетичного алгоритму забезпечує еволюцію популяції наборів розташування дронів до оптимальних рішень, що забезпечують ефективне покриття території. Використання функції якості для оцінки ефективності, турнірного відбору для збереження найкращих наборів, кросовера для створення нових конфігурацій та мутації для підтримки генетичної різноманітності дозволяє генетичному алгоритму знаходити оптимальні рішення для задачі покриття території роєм БпЛА.

3.1.3. Кросовер

Кросовер є важливим етапом у генетичному алгоритмі, оскільки він дозволяє створювати нові конфігурації розташування дронів, комбінуючи гени (розташування дронів) від обраних батьківських наборів. Цей процес імітує природний генетичний обмін і дозволяє алгоритму знаходити потенційно більш ефективні рішення. У нашому дослідженні кросовер допомагає об'єднати найкращі характеристики різних наборів розташування дронів для покращення покриття території.

Процес кросовера включає кілька основних кроків. Спершу, після процесу відбору, де обираються найкращі набори розташування дронів, формуються батьківські пари для подальшого кросовера. Ці пари можуть бути обрані випадковим чином або на основі оцінок функції якості, що забезпечує комбінацію найефективніших конфігурацій. У кожній парі батьків визначається одна або кілька точок кросовера, де відбуватиметься обмін генами між ба-

тьками. Точка кросовера може бути обрана випадково або визначена наперед, залежно від обраної стратегії кросовера. У визначених точках кросовера гени (розташування дронів) між батьківськими наборами обмінюються, створюючи дві нові конфігурації. Наприклад, якщо точка кросовера визначена в середині геному, то перша половина геному першого батька комбінується з другою половиною геному другого батька, і навпаки. Нові конфігурації, отримані після кросовера, формують нову популяцію наборів розташування дронів. Ці нові набори можуть бути піддані подальшій мутації для забезпечення генетичної різноманітності.

Нехай ми маємо два батьківські набори розташування дронів:

Батько 1:

$$(x_{1_1}, y_{1_1}), (x_{1_2}, y_{1_2}), \dots, (x_{1_n}, y_{1_n})$$

та Батько 2: $(x_{2_1}, y_{2_1}), (x_{2_2}, y_{2_2}), \dots, (x_{2_n}, y_{2_n})$.

Припустимо, що ми обираємо одну точку кросовера, яка знаходиться після третього гена. Тоді нові конфігурації розташування дронів будуть виглядати наступним чином:

Дитина 1: $(x_{1_1}, y_{1_1}), (x_{1_2}, y_{1_2}), (x_{1_3}, y_{1_3}), (x_{2_4}, y_{2_4}), \dots, (x_{2_n}, y_{2_n})$ та

Дитина 2: $(x_{2_1}, y_{2_1}), (x_{2_2}, y_{2_2}), (x_{2_3}, y_{2_3}), (x_{1_4}, y_{1_4}), \dots, (x_{1_n}, y_{1_n})$. Цей процес дозволяє поєднати генетичну інформацію від двох батьківських наборів, створюючи нові конфігурації, які можуть успадкувати найкращі характеристики обох батьків.

Реалізація кросовера може бути описана за допомогою математичних формул. Нехай P_1 і P_2 — це два батьківські набори, які складаються з n дронів, де

$$P_1 = \{(x_{1_1}, y_{1_1}), (x_{1_2}, y_{1_2}), \dots, (x_{1_n}, y_{1_n})\}$$

та

$$P_2 = \{(x_{2_1}, y_{2_1}), (x_{2_2}, y_{2_2}), \dots, (x_{2_n}, y_{2_n})\}.$$

Визначимо точку кросовера c , яка ділить батьківські набори на дві частини:

$$P_1 = \{P_{1_L}, P_{1_R}\}$$

та

$$P_2 = \{P_{2_L}, P_{2_R}\},$$

де

$$P_{1_L} = \{(x_{1_1}, y_{1_1}), \dots, (x_{1_c}, y_{1_c})\}$$

та

$$P_{1_R} = \{(x_{1_{c+1}}, y_{1_{c+1}}), \dots, (x_{1_n}, y_{1_n})\},$$

аналогічно для P_2 . Тоді нові набори C_1 і C_2 (діти) будуть визначені як:

$$C_1 = \{P_{1_L}, P_{2_R}\}$$

та

$$C_2 = \{P_{2_L}, P_{1_R}\}.$$

Таким чином, реалізація кросовера в генетичному алгоритмі дозволяє ефективно створювати нові конфігурації розташування дронів, комбінуючи найкращі характеристики батьківських наборів. Це сприяє поступовій еволюції популяції до більш ефективних рішень, що забезпечують максимальне покриття території з мінімальними перекриттями.

3.1.4. Мутація

Мутація є важливим етапом у генетичному алгоритмі, оскільки вона забезпечує генетичну різноманітність у популяції, що дозволяє уникнути застою в локальних оптимумах і сприяє дослідженню ширшого простору можливих рішень. У контексті нашого дослідження мутація допомагає покращити конфігурації розташування дронів, вводячи випадкові зміни до їх положень, що може призвести до виявлення більш ефективних рішень для покриття території.

Процес мутації у нашому генетичному алгоритмі включає кілька основних кроків. Після проведення кросовера та формування нових конфігурацій розташування дронів, до деяких з цих конфігурацій застосовується мутація. Цей процес відбувається з певною ймовірністю, яка визначається параметрами алгоритму. Мутація може включати випадкові зміни координат одного або декількох дронів у конфігурації, що дозволяє створити нові варіанти розташування.

Нехай ми маємо конфігурацію розташування дронів, що складається з n дронів, де кожен дрон має координати (x_i, y_i) для $i = 1, 2, \dots, n$. Процес мутації можна описати наступним чином:

- Визначення ймовірності мутації: Для кожної конфігурації розташування дронів визначається ймовірність мутації p_m . Якщо випадкове число, згенероване для конфігурації, менше або дорівнює p_m , до цієї конфігурації буде застосована мутація.
- Вибір дрона для мутації: Вибирається один або кілька дронів у конфігурації, до яких буде застосована мутація. Вибір може бути випадковим або на основі якихось критеріїв, наприклад, найбільша відстань до центроїда.

- Застосування мутації: Координати обраного дрона змінюються випадковим чином у певному діапазоні. Наприклад, нові координати (x'_i, y'_i) можуть бути визначені як:

$$x'_i = x_i + \Delta x$$

$$y'_i = y_i + \Delta y$$

де Δx і Δy — це випадкові зміни, що обираються з нормального розподілу з середнім значенням нуль і стандартним відхиленням σ .

Математично процес мутації можна представити наступними формулами:

$$x'_i = x_i + \mathcal{N}(0, \sigma_x)$$

$$y'_i = y_i + \mathcal{N}(0, \sigma_y)$$

де $\mathcal{N}(0, \sigma)$ — нормальний розподіл з середнім значенням нуль і стандартним відхиленням σ , яке визначає величину змін координат.

Наприклад, якщо конфігурація розташування дронів спочатку виглядає як

$$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$$

, після мутації вона може змінитися на

$$\{(x_1, y_1), (x'_2, y'_2), \dots, (x_n, y_n)\}$$

, де координати одного або кількох дронів було змінено.

Мутація дозволяє генетичному алгоритму зберігати генетичну різноманітність у популяції, що сприяє уникненню застою у локальних оптимумах і дозволяє досліджувати нові області пошукового простору. Вона також може допомогти алгоритму знайти більш ефективні рішення для задачі покриття території роєм БПЛА, вводячи невеликі, але потенційно значущі зміни у конфігурації розташування дронів.

Таким чином, процес мутації є невід'ємною частиною генетичного алгоритму, який забезпечує його здатність до адаптації та еволюції.

На основі описаних методів генетичного алгоритму (ГА) ми визначили підхід до оптимізації початкового положення кожного дрона для забезпечення ефективного покриття території. Функція якості, що враховує максимізацію покриття та мінімізацію перекриттів, дозволяє оцінити ефективність різних конфігурацій розташування дронів. Процес відбору забезпечує збереження найкращих конфігурацій, які згодом використовуються для створення нових поколінь шляхом кросовера. Кросовер дозволяє комбінувати найкращі характеристики батьківських наборів, створюючи нові потенційно більш ефективні конфігурації. Мутація, в свою чергу, вводить випадкові зміни в конфігурації, забезпечуючи генетичну різноманітність і дозволяючи досліджувати нові області пошукового простору.

Ці етапи взаємодіють, забезпечуючи еволюцію популяції конфігурацій розташування дронів до оптимальних рішень, які забезпечують максимально ефективне покриття території. У наступних розділах роботи буде проведено детальний аналіз роботи даного алгоритму, включаючи оцінку його ефективності в різних сценаріях та порівняння з іншими підходами до задачі

покриття території роєм безпілотних літальних апаратів.

3.2. Розподіл території на сектори під кожен дрон

Після визначення оптимального початкового положення для кожного дрона, наступним важливим етапом є розподіл території на сектори, які будуть покриті кожним дроном. Для цього ми використовуємо діаграму Вороного, яка є ефективним методом для просторового розбиття площини на області, що відповідають наборам точок (в даному випадку, початковим положенням дронів).

Діаграма Вороного дозволяє визначити області впливу кожного дрона, забезпечуючи таким чином, що кожен дрон відповідає за покриття найближчої до нього території. Це сприяє мінімізації перекриттів між зонами покриття дронів і забезпечує більш ефективне використання їх ресурсів. Дана діаграма є потужним інструментом для просторового розподілу ресурсів, і її застосування в контексті рою дронів дозволяє значно підвищити ефективність виконання завдань покриття території. У цьому розділі ми детально розглянуто методологію побудови та використання діаграми Вороного для розподілу території на сектори під кожен дрон у різних сценаріях.

Діаграма Вороного для множини точок $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ у площині є розбиттям площини на комірки, кожна з яких відповідає одній точці з множини P . Комірка Вороного $V(p_i)$ для точки p_i визначається як множина всіх точок у площині, які ближчі до p_i , ніж до будь-якої іншої точки з P :

$$V(p_i) = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid d(x, p_i) < d(x, p_j) \ \forall j \neq i\}$$

де $d(x, p_i)$ — це евклідова відстань між точками x та p_i :

$$d(x, p_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

Побудова діаграми Вороного починається зі збору початкових положень дронів, які представлені у вигляді множини координат $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$. Для кожної пари початкових положень дронів (p_i, p_j) будується перпендикулярний бісектор, який є геометричним місцем точок, рівновіддалених від p_i та p_j . Рівняння бісектора для точок $p_i = (x_i, y_i)$ та $p_j = (x_j, y_j)$ виглядає наступним чином:

$$(x - x_i)(x_j - x_i) + (y - y_i)(y_j - y_i) = \frac{1}{2}((x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2))$$

Кожна комірка Вороного $V(p_i)$ визначається як перетин всіх півплощин, що визначаються перпендикулярними бісекторами між точкою p_i та всіма іншими точками з множини P :

$$V(p_i) = \bigcap_{j \neq i} H(p_i, p_j)$$

де $H(p_i, p_j)$ — це півплощина, що містить точку p_i і обмежена бісектором між p_i та p_j .

Для практичної реалізації діаграми Вороного використовуються числові методи і алгоритми обчислювальної геометрії, такі як алгоритм Форчуна. Алгоритм Форчуна є планарним алгоритмом побудови діаграми Вороного, який працює за час $O(n \log n)$. Алгоритм базується на побудові "параболічної дуги" для кожної точки, яка переміщується вниз по площині, утворюючи межі

комірок Вороного. Після побудови діаграми Вороного комірки можна інтерполювати і візуалізувати для кожного дрона, показуючи області покриття, за які вони відповідають.

Діаграма Вороного, описана раніше, працює лише за умови, що всі дрони є рівними, адже вона враховує лише найближчу відстань до точок. Однак, у випадку гетерогенних роїв дронів, де кожен дрон може мати різні характеристики та можливості, стандартна діаграма Вороного не є оптимальним рішенням. Для врахування гетерогенності необхідно використати зважену діаграму Вороного (Weighted Voronoi diagram), яка дозволяє задавати додаткове значення важливості кожного дрону, що відповідатиме більшому або меншому сектору, виділеному для дрона.

Аддитивно зважена діаграма Вороного (Additively weighted Voronoi diagram) є підвидом зваженої діаграми Вороного ідеально підходить для цієї задачі. У цій діаграмі кожній точці (дрону) призначається вага, яка впливає на розмір її зони покриття.

Аддитивно зважена діаграма Вороного для множини точок $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ з вагами $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ визначається як множина всіх точок у площині, які ближчі до точки p_i з урахуванням її ваги, ніж до будь-якої іншої точки p_j з її вагою:

$$V_w(p_i) = \{x \in \mathbb{R}^2 \mid d(x, p_i) - w_i < d(x, p_j) - w_j \ \forall j \neq i\}$$

де $d(x, p_i)$ — це евклідова відстань між точками x та p_i :

$$d(x, p_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

Побудова зваженої діаграми Вороного починається зі збору початкових положень дронів і призначення ваг кожному дрону. Нехай $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ — це початкові положення n дронів, а $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ — їх ваги. Для кожної пари дронів (p_i, p_j) будемо перпендикулярний бісектор з урахуванням їх ваг. Рівняння бісектора для точок $p_i = (x_i, y_i)$ з вагою w_i та $p_j = (x_j, y_j)$ з вагою w_j виглядає наступним чином:

$$(x - x_i)(x_j - x_i) + (y - y_i)(y_j - y_i) = \frac{1}{2} ((x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2) - (w_i^2 - w_j^2))$$

Кожна комірка зваженої діаграми Вороного $V_w(p_i)$ визначається як перетин всіх півплощин, що визначаються перпендикулярними бісекторами між точкою p_i та всіма іншими точками з множини P з урахуванням їх ваг:

$$V_w(p_i) = \bigcap_{j \neq i} H_w(p_i, p_j)$$

де $H_w(p_i, p_j)$ — це півплощина, що містить точку p_i і обмежена бісектором між p_i та p_j з урахуванням їх ваг.

Для практичної реалізації зваженої діаграми Вороного використовуються числові методи і алгоритми обчислювальної геометрії, які розширюють можливості стандартної діаграми Вороного для роботи з вагами. Один з таких методів — модифікація алгоритму Форчуна, яка дозволяє враховувати ваги точок при побудові діаграми.

Використання зваженої діаграми Вороного для розподілу території дозволяє ефективно визначити зони покриття кожного дрона з урахуванням їх індивідуальних можливостей і характеристик, забезпечуючи мінімізацію

перекриттів і максимальне покриття території.

3.3. Знаходження маршруту для покриття кожного сектору

Планування маршруту для БПЛА є важливим етапом у забезпеченні ефективного і повного покриття визначеної території. Головна мета полягає у тому, щоб дрон пройшов через всі точки або області, які потребують спостереження або обробки, забезпечуючи при цьому мінімальні витрати часу і ресурсів. У цьому підрозділі описується процес побудови маршруту для одного дрона, що забезпечує повне покриття території одного сектора, описаного точками (x_i, y_i) . Для цього завдання було обрано алгоритм поділу на смуги, який ефективно покриває область, розбиваючи її на смуги та рухаючись через кожен смугу у зигзагоподібному порядку.

Процес починається з визначення меж сектора, а саме мінімальних та максимальних значень координат x та y , які задаються як

$$x_{\min} = \min(x_i), \quad x_{\max} = \max(x_i)$$

$$y_{\min} = \min(y_i), \quad y_{\max} = \max(y_i)$$

Ці значення визначають область, яку необхідно покрити дроном. Наступним кроком є розбиття області на вертикальні смуги однакової ширини. Кількість смуг N визначається відповідно до бажаного рівня деталізації та можливостей дрона. Ширина кожної смуги обчислюється за формулою

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}$$

а координати меж кожної смуги визначаються як

$$x_j = x_{\min} + j \cdot \Delta x$$

для $j = 0, 1, \dots, N$.

Маршрут дрона будується у зигзагоподібному порядку через кожну смугу. Для кожної смуги j вибираються точки, що потрапляють у цю смугу, тобто точки, які задовольняють умову

$$S_j = \{(x_i, y_i) \mid x_j \leq x_i \leq x_{j+1}\}$$

Після цього точки у кожній смузі сортуються за координатою y для забезпечення послідовного руху вгору або вниз. Якщо смуга має парний індекс j , дрон рухається знизу вгору вздовж смуги, проходячи через всі точки у порядку зростання y , тобто

$$(x_j, y_{\min}) \rightarrow (x_j, y_{\max})$$

Якщо індекс смуги непарний, дрон рухається зверху вниз, тобто у зворотному напрямку, проходячи через точки у порядку зменшення y , що відповідає формулі

$$(x_j, y_{\max}) \rightarrow (x_j, y_{\min})$$

Після завершення покриття однієї смуги дрон переходить до наступної: для парних смуг перехід відбувається до нижньої точки наступної смуги

$$(x_{j+1}, y_{\min})$$

а для непарних смуг — до верхньої точки наступної смуги

$$(x_{j+1}, y_{\max})$$

Даний підхід не є оптимальним, адже розбиває сектор виключно на вертикальні смуги, що може бути неефективним для багатьох форм сектору через збільшену кількість розворотів дрона. Для виправлення цієї проблеми було запропоновано розбивати сектор на смуги, паралельні найдовшому діаметру сектору. Це дозволяє значно зменшити кількість розворотів і покращити ефективність покриття території.

Спочатку для всіх точок сектору визначається найдовша відстань між будь-якими двома точками, яка і буде найдовшим діаметром. Якщо точки сектора позначаються як $P_i(x_i, y_i)$, то найдовший діаметр d_{max} обчислюється як:

$$d_{max} = \max_{i,j} \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

Кут θ , під яким знаходиться цей діаметр відносно осі Y , визначається за допомогою функції арктангенса:

$$\theta = \arctan 2(y_j - y_i, x_j - x_i)$$

Усі точки сектору повертаються на кут θ навколо центроїда (центра мас) всього набору точок, щоб найдовший діаметр був паралельний осі Y . Центро-

їд обчислюється як середнє значення координат усіх точок:

$$C_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad C_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

де C_x і C_y — координати центроїда. Поворот координат точок здійснюється за формулами:

$$x' = (x - C_x) \cos(-\theta) - (y - C_y) \sin(-\theta) + C_x$$

$$y' = (x - C_x) \sin(-\theta) + (y - C_y) \cos(-\theta) + C_y$$

Після повороту сектору на кут θ всі точки поділяються на смуги вздовж осі Y' , тобто вертикально, що мінімізує кількість смуг та забезпечує ефективніше покриття. Після цього сектор повертається назад на кут $-\theta$, щоб повернути його до початкової орієнтації, і визначаються маршрути для кожної смуги. Формули для зворотного повороту:

$$x'' = (x' - C_x) \cos(\theta) - (y' - C_y) \sin(\theta) + C_x$$

$$y'' = (x' - C_x) \sin(\theta) + (y' - C_y) \cos(\theta) + C_y$$

Цей підхід дозволяє мінімізувати кількість смуг та, відповідно, кількість розворотів дрона, що призводить до більш ефективного використання ресурсів та зменшення загального часу на покриття території.

Загальний маршрут дрона для покриття сектора складається з послідовності ліній, що описують зигзагоподібний рух через усі смуги. Цей підхід забезпечує покриття всієї території сектора, мінімізуючи пропуски та перекриття. Завдяки ефективності алгоритму поділу на смуги, дрон здатен пов-

ністю покрити задану область з мінімальними витратами часу та енергії.

На завершення розділу "Розробка та адаптація алгоритмів" важливо підсумувати основні досягнення та результати проведеного дослідження. У цьому розділі ми детально розглянули процес розробки та адаптації алгоритмів для оптимізації покриття території за допомогою рою БпЛА. Особлива увага була приділена питанню масштабованості та гетерогенності рою, що є ключовими факторами у забезпеченні ефективності покриття великих та складних територій.

3.4. Висновки до розділу

У цьому розділі було детально розглянуто процес розробки алгоритму покриття території роєм дронів, зокрема із застосуванням генетичних алгоритмів. Алгоритм розроблений з урахуванням таких ключових критеріїв, як ефективність використання ресурсів, зокрема енергії дронів, а також мінімізація кількості розворотів під час польотів. Крім того, алгоритм було адаптовано для роботи в різних умовах, від простих територій з однорідними роями до складних конфігурацій територій із гетерогенними роями.

Одним із головних результатів розробки стало вдосконалення методології розподілу секторів території відповідно до можливостей кожного дрона, а також оптимізація маршрутів для ефективного покриття території. Робота, проведена на цьому етапі, закладає основу для подальшого вдосконалення алгоритмів та їхнього практичного застосування. У наступних розділах буде детально проаналізовано результати експериментальної перевірки запропонованих алгоритмів, а також окреслено шляхи покращення їхньої ефективності в реальних умовах.

РОЗДІЛ 4

Перевірка алгоритму покриття території роєм БпЛА

У цьому розділі буде проведена експериментальна перевірка алгоритму покриття території роєм дронів, що був розроблений і описаний у попередньому розділі. Основна мета цього тестування — оцінити ефективність і надійність алгоритму в різних сценаріях покриття території.

Для цього буде розглянуто три різних випадки, що відрізняються розміром рою, типом дронів та складністю покриваємої території. У першому випадку буде протестовано невеликий рій, що складається з однакових дронів, на задачі покриття невеликої території з простою геометрією. Другий випадок передбачає тестування рою середнього розміру, який включає кілька типів дронів, на більш складній території нестандартної форми. У третьому випадку буде проведено тестування великого рою, що складається з різних типів дронів, на задачі покриття великої ділянки з складною формою.

Кожен з цих експериментів дозволить детально оцінити роботу алгоритму в умовах різної складності та розміру рою, а також виявити можливі переваги та обмеження підходу, який був запропонований. Результати експериментів дадуть змогу зробити висновки щодо ефективності алгоритму та його придатності для застосування в різних сценаріях.

4.1. Невеликий рій дронів для покриття простої території

У першому експерименті буде проведена перевірка алгоритму покриття території роєм дронів на базовому сценарії, де територія має просту геометрію, а рій складається з невеликої кількості однакових дронів. Для цього тестування було обрано квадратну територію, описану точками $(0, 0)$ — $(10, 10)$, що забезпечує рівномірний і простий простір для моделювання.

Рій складається з десяти однакових дронів, що дозволяє зосередитися на оцінці ефективності алгоритму в умовах однорідного рою та відсутності складнощів, пов'язаних із різноманітністю можливостей дронів. Такий підхід дозволяє виявити базову продуктивність алгоритму і перевірити, як він справляється з простою задачею покриття території.

Цей експеримент надасть початкові дані щодо роботи алгоритму та дозволить оцінити ефективність покриття території в найпростіших умовах. Результати цього тестування будуть використані як базовий рівень для подальших, більш складних експериментів.

4.1.1. Пошук початкових положень

Після визначення основних параметрів для першого експерименту, де рій складається з десяти однакових дронів, а територія є квадратною, розміром 10x10 одиниць, використовується генетичний алгоритм для знаходження оптимальних початкових позицій дронів. Початкові позиції генеруються випадковим чином для кожного дрона. Потім ці позиції оптимізуються за допомогою генетичного алгоритму, який враховує два основних критерії: максимізацію покриття території та мінімізацію перекриття зон покриття окремих дронів.

Параметри генетичного алгоритму, використані для оптимізації покриття: розмір популяції становить 30, кількість поколінь - 150, частка мутації - 10%, частка еліт кожного покоління - 10%.

Після проходження умов ГА були отриманні наступні положення:

Дрон	Координата X	Координата Y
1	8.249996	1.157378
2	4.469396	3.608872
3	8.249994	4.635439
4	5.236621	8.249989
5	5.165334	5.498835
6	1.527129	1.750060
7	8.735559	8.249957
8	4.953644	1.345843
9	1.750000	5.352975
10	1.750033	8.779319

Табл. 4.1: Кінцеві положення дронів після оптимізації генетичним алгоритмом

На території покриття дані початкові положення виглядають наступним чином:

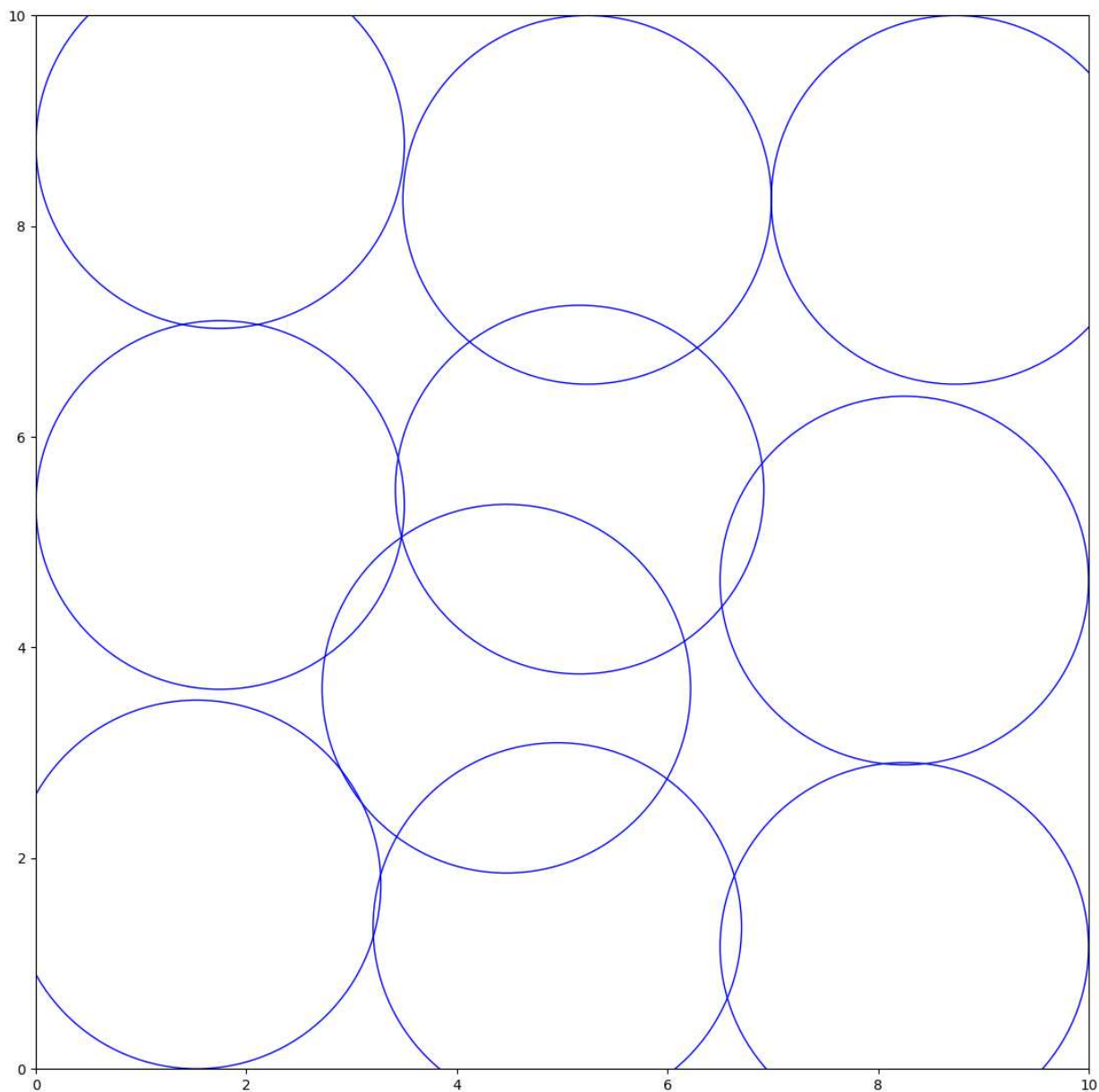


Рис. 4.1: Початкові положення першого тесування

Як бачимо на рисунку 5.1 завдяки ГА початкове розташування дронів покрито максимальну кількість території, мінімізувавши, при цьому, перекриття зон покриття між дронами.

4.1.2. Розподіл териорії на окремі сектори

Після визначення оптимальних початкових положень для дронів наступним етапом є розподілення території на сектори, які кожен дрон буде покри-

вати. Цей процес є критично важливим, оскільки правильний розподіл території на сектори дозволяє мінімізувати перекриття зон покриття між дронами та забезпечити рівномірне покриття всієї площі.

Кожен дрон отримує унікальний сектор, що формується на основі його початкового положення, визначеного на попередньому етапі. Сектори розподіляються таким чином, щоб всі частини території були охоплені, і жодна зона не залишилася непокритою або перекритою кількома дронами. У випадку з квадратною територією розміром 10×10 одиниць сектор для кожного дрона визначається з використанням методу Вороного, який формує адитивно зважену діаграму Вороного на основі початкових положень дронів.

Процес розподілу на сектори включає визначення границь секторів на основі початкових положень дронів, формування адитивно зваженої діаграми Вороного, де кожна клітина діаграми відповідає сектору, що покривається конкретним дроном, а також оптимізацію меж секторів для забезпечення рівномірного розподілу площі між дронами, уникнення надмірного перекриття та мінімізації пропусків.

Кожен сектор обмежений так, щоб дрон міг оптимально покрити його без зайвих витрат енергії та часу, при цьому всі сектори разом утворюють повне покриття заданої території. Такий підхід гарантує, що кожен дрон зможе ефективно виконати свою задачу, мінімізуючи ризики колізій і забезпечуючи оптимальне покриття території. Результати цього етапу створюють основу для подальшого виконання задачі покриття території, оскільки визначають зони відповідальності кожного дрона, що є важливим для успішного завершення місії.

Створивши адитивно зважену діаграму Вороного отримуємо наступні

точки, які визначають ребра діаграми:

Ребро	X1	Y1	X2	Y2
1	3.593577	3.593567	2.612246	0.000000
2	2.738326	0.000000	6.688349	6.616957
3	2.237107	0.000000	3.527076	3.147763
4	7.154756	7.154914	3.265095	0.000000
5	2.845770	2.845822	10.000000	6.765743
6	6.205138	6.601913	10.000000	7.216660
7	6.865976	10.000000	7.023992	7.024080
8	10.000000	7.154756	3.766563	3.265095
9	2.237107	3.593577	3.527076	2.612246
10	2.237107	2.738326	3.527076	6.688349
11	6.865976	6.601913	7.023992	7.216660
12	6.865976	7.008945	7.023992	3.381379
13	2.738326	2.845822	6.688349	6.765743
14	4.247624	5.052347	6.422274	3.487105
15	4.247624	6.601913	6.422274	7.216660
16	4.247624	2.845822	6.422274	6.765743
17	3.593577	5.052347	2.612246	3.487105
18	5.052347	7.008945	3.487105	3.381379
19	7.154756	7.008945	3.265095	3.381379

Табл. 4.2: Координати ребер діаграми Вороного

На території покриття дана діаграма разом виглядає наступним чином:

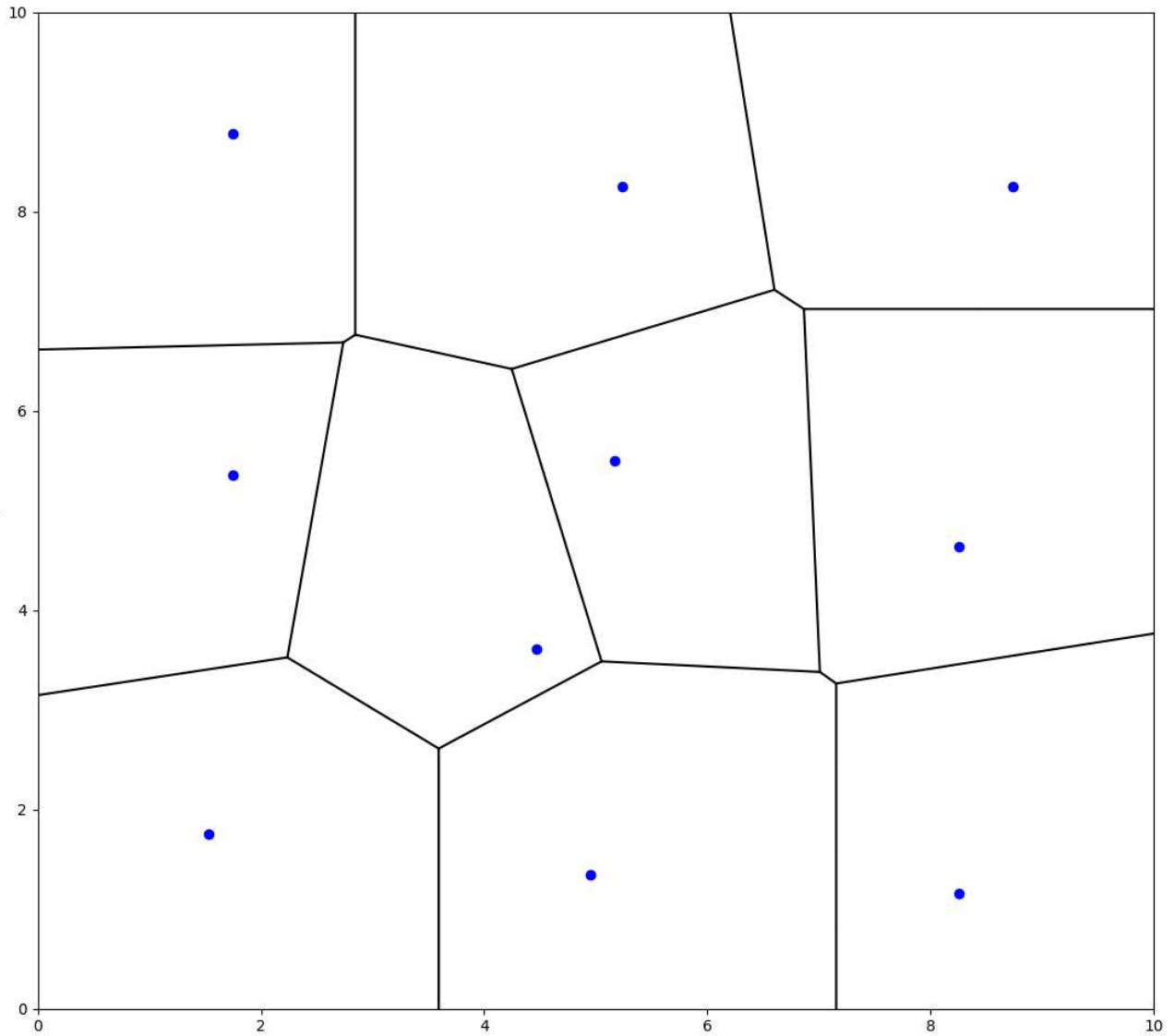


Рис. 4.2: Розподіл території на сектори

Оскільки в даному експерименті були використані дрони однакового типу, то вага всіх секторів у адитивно зваженій діаграмі Вороного однакова, через що вона виглядає як звичайна діаграма Вороного.

4.1.3. Пошук маршруту покриття сектору кожним дроном

Третім етапом алгоритму покриття є пошук оптимального маршруту покриття кожного сектору, який був визначений на попередніх етапах. Для цього етапу використовується алгоритм поділу на смуги, який добре підхо-

дять для покриття сектора з відносно простою геометрією. Алгоритм працює шляхом проходження дрона по смугах, які формуються всередині сектора, рухаючись від однієї межі сектора до протилежної. Дрон рухається зигзагоподібно вздовж смуг, поступово перекриваючи всю територію.

Процес пошуку маршруту покриття включає декілька ключових кроків. Спочатку сектор розбивається на смуги однакової ширини, виходячи з початкового положення дрона. Далі для кожної смуги визначається послідовність руху, яка мінімізує відстань, що долає дрон, і забезпечує максимальне покриття. Результатом цього етапу є набір оптимальних маршрутів покриття для кожного дрона, які дозволяють досягти максимально ефективного покриття території. Ці маршрути є кінцевою частиною алгоритму покриття, забезпечуючи виконання завдання з мінімальними витратами часу та енергії, а також гарантують, що вся територія буде повністю покрита без значних пропусків або перекриттів.

Перш ніж знаходити маршрути для всіх секторів, розглянемо алгоритм на прикладі одного сектору зображеного на рисунку 5.3.

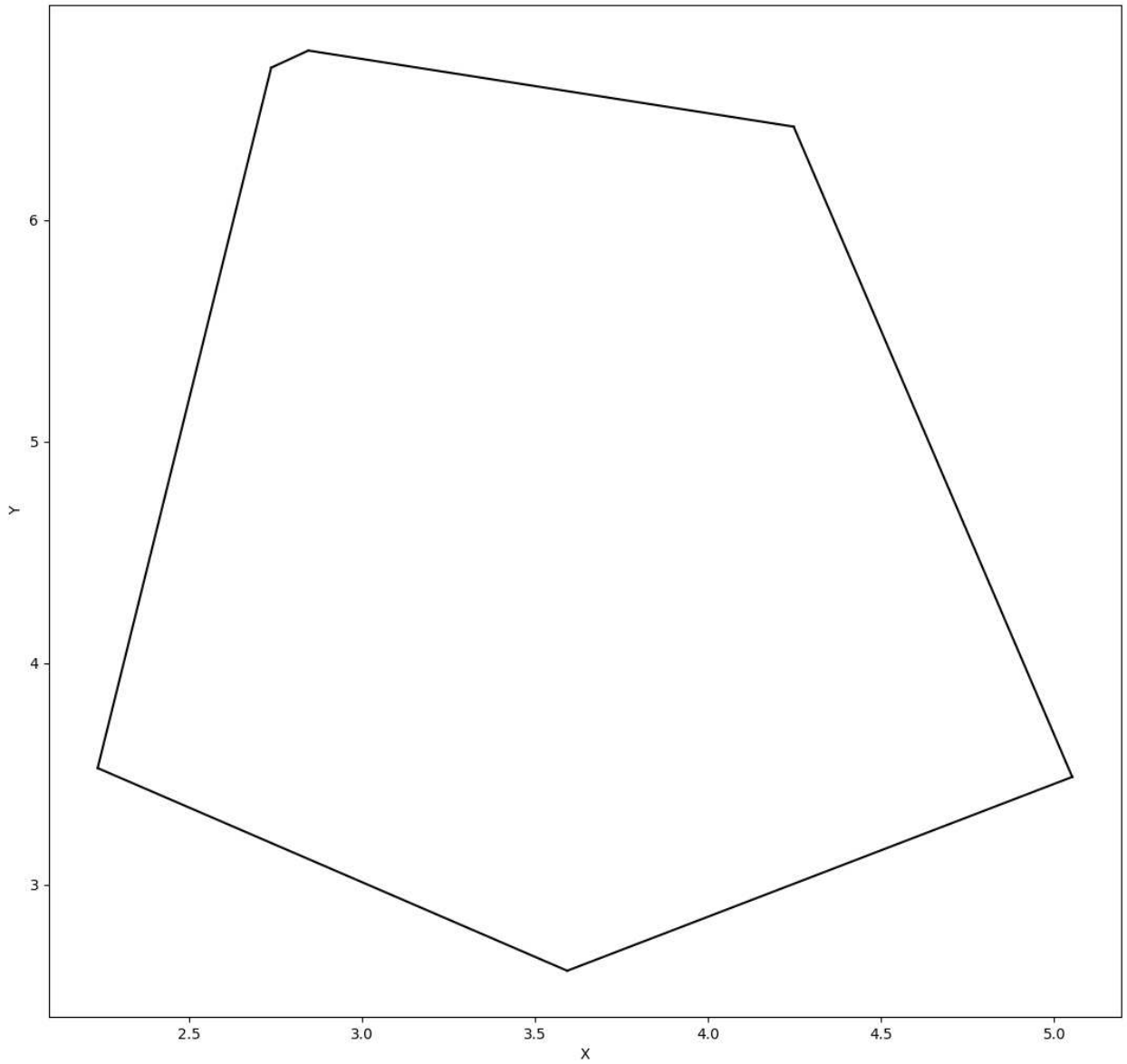


Рис. 4.3: Сектор діаграми Вороного

Спочатку знаходиться найдовший діаметр сектора, як найдовша відстань між двома точками сектора, відносно якого будуть будуватись смуги розподілу сектора.

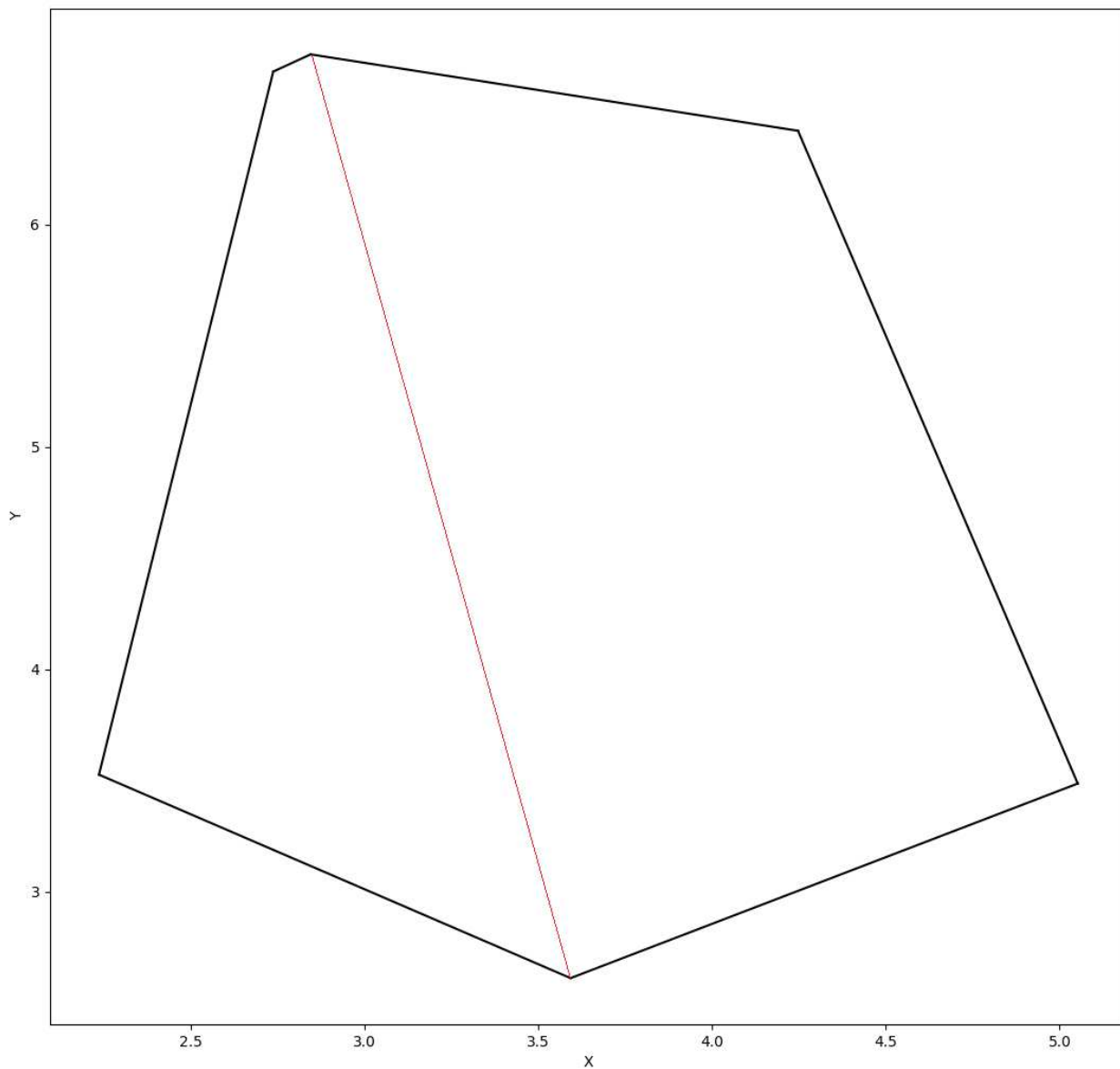


Рис. 4.4: Діаметр сектору діаграми Вороного

Далі визначається кут θ , під яким знаходиться цей діаметр відносно осі Y і усі точки сектору повертаються на цей кут навколо центру мас всього набору точок, щоб найдовший діаметр був паралельний осі Y .

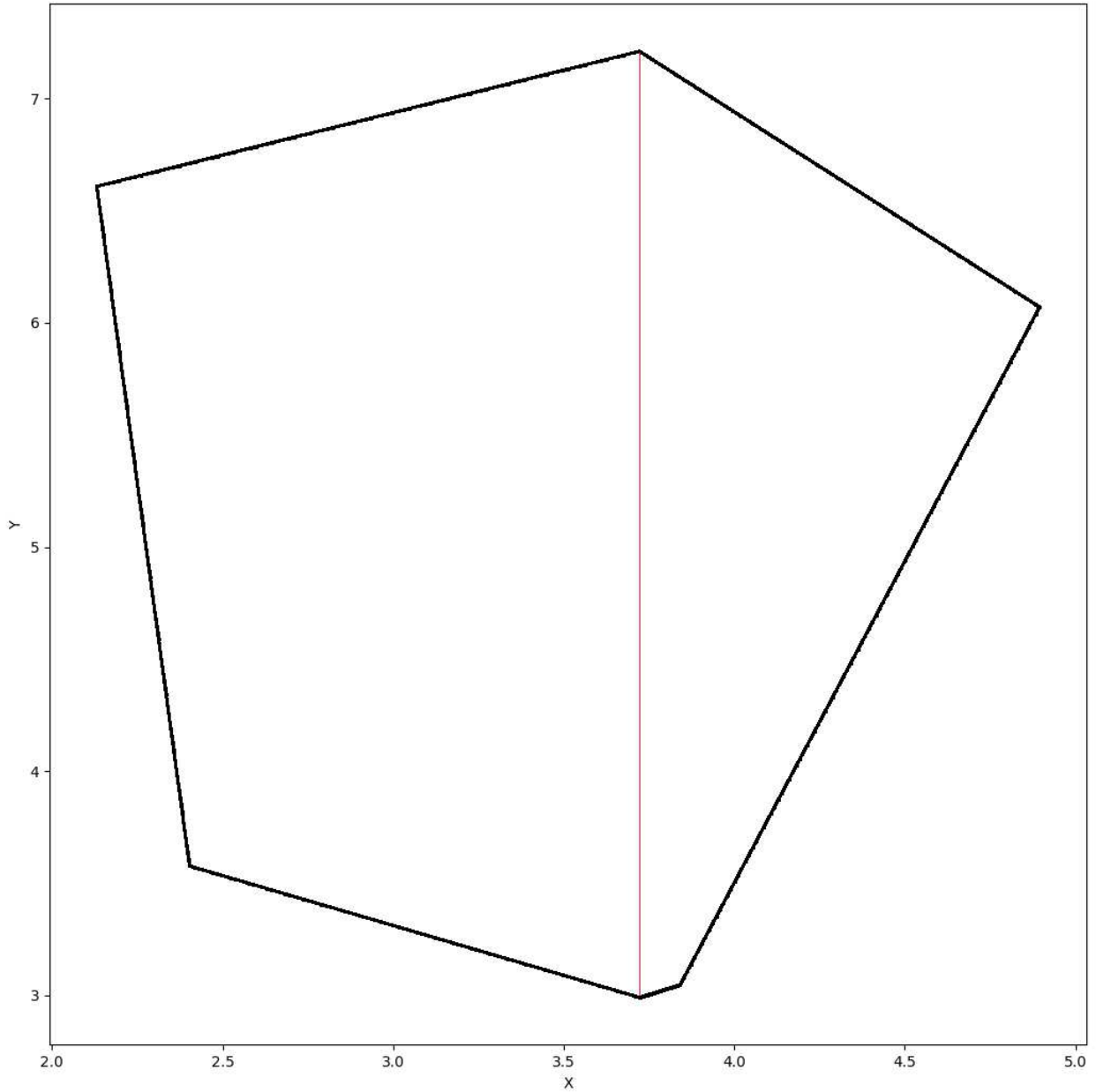


Рис. 4.5: Повернутий сектор діаграми Вороного

Наступним кроком, сектор поділяються на смуги вздовж осі Y' та діаметра, що мінімізує кількість смуг.

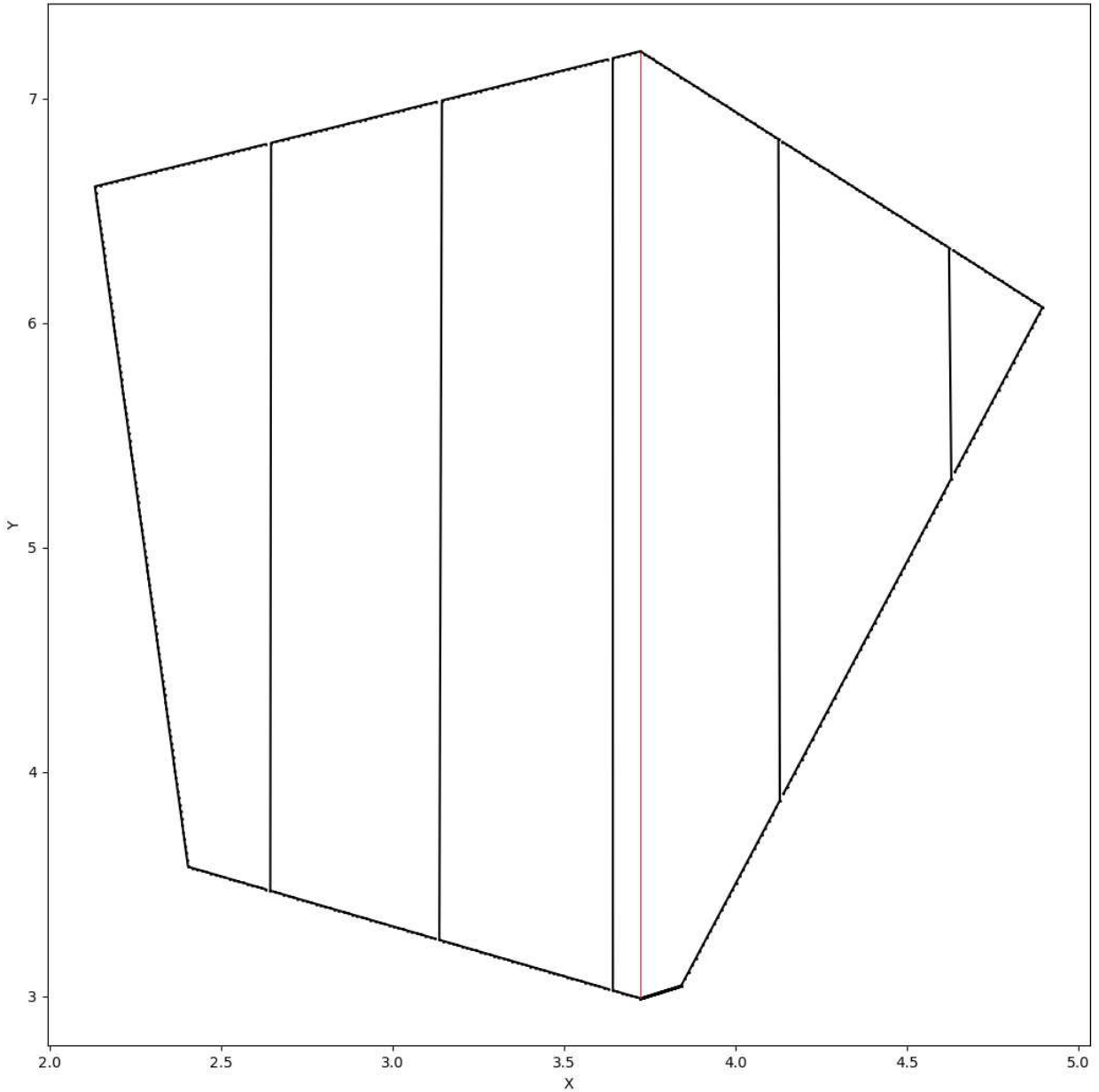


Рис. 4.6: Повернутий сектор діаграми Вороного поділений на смуги

І останнім етапом, всі точки сектору разом з точками, що утворюють смуги, повертаються на кут $-\theta$ відносно осі Y , отримуючи оригнальний сектор, розділений на смуги вздовж найдовшого діаметру.

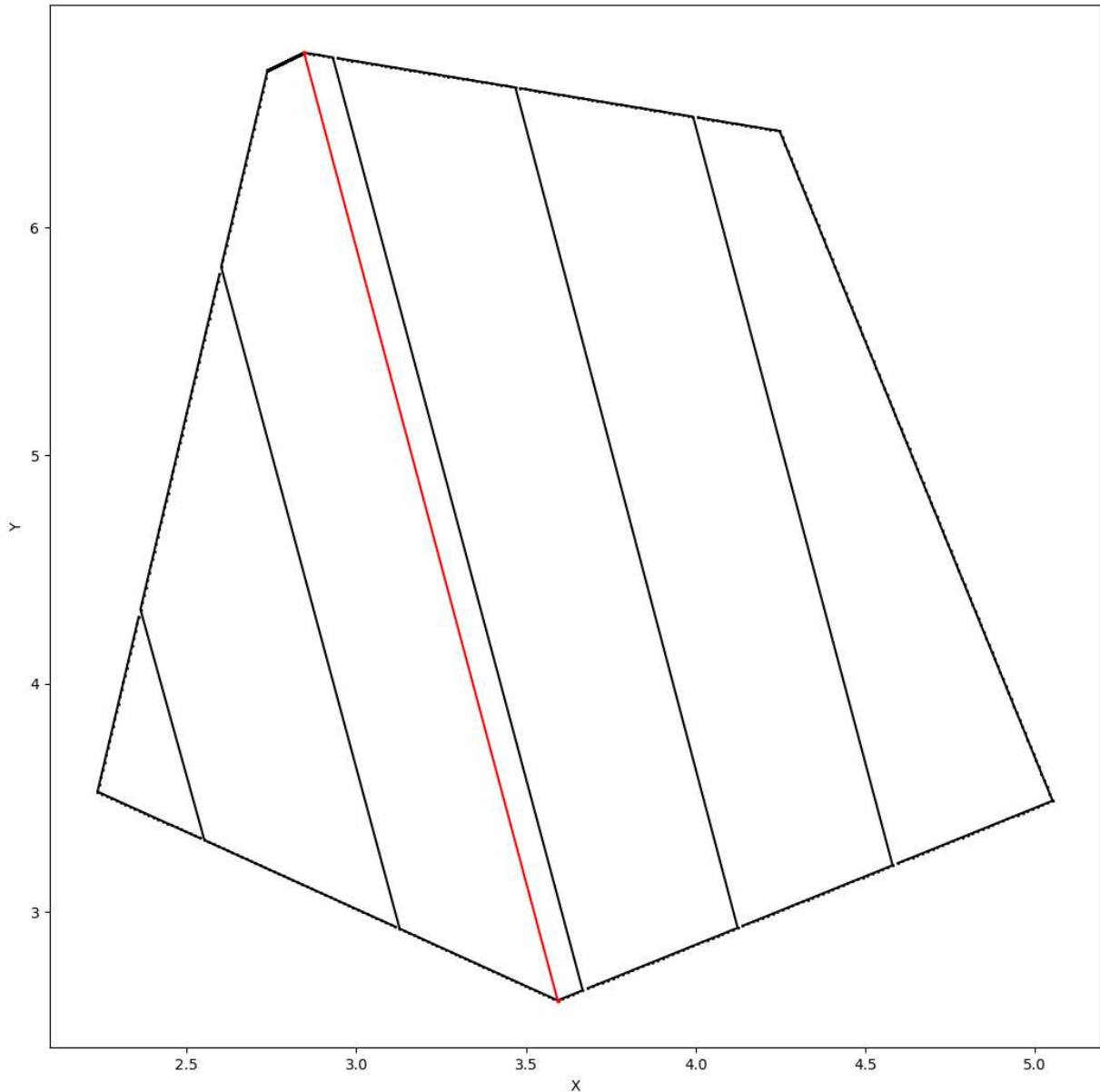


Рис. 4.7: Сектор діаграми Вороного поділений на смуги

Виконавши данні дії для кожного сектору на території, отримуємо маршрути для кожного дрону, які повністю перекривають задану територію. Результат даного покриття зображений на рисунку 5.8 де кожен сектор виділений окремим кольором. Червоним пунктиром зображено найдовший діаметр для кожного сектору.

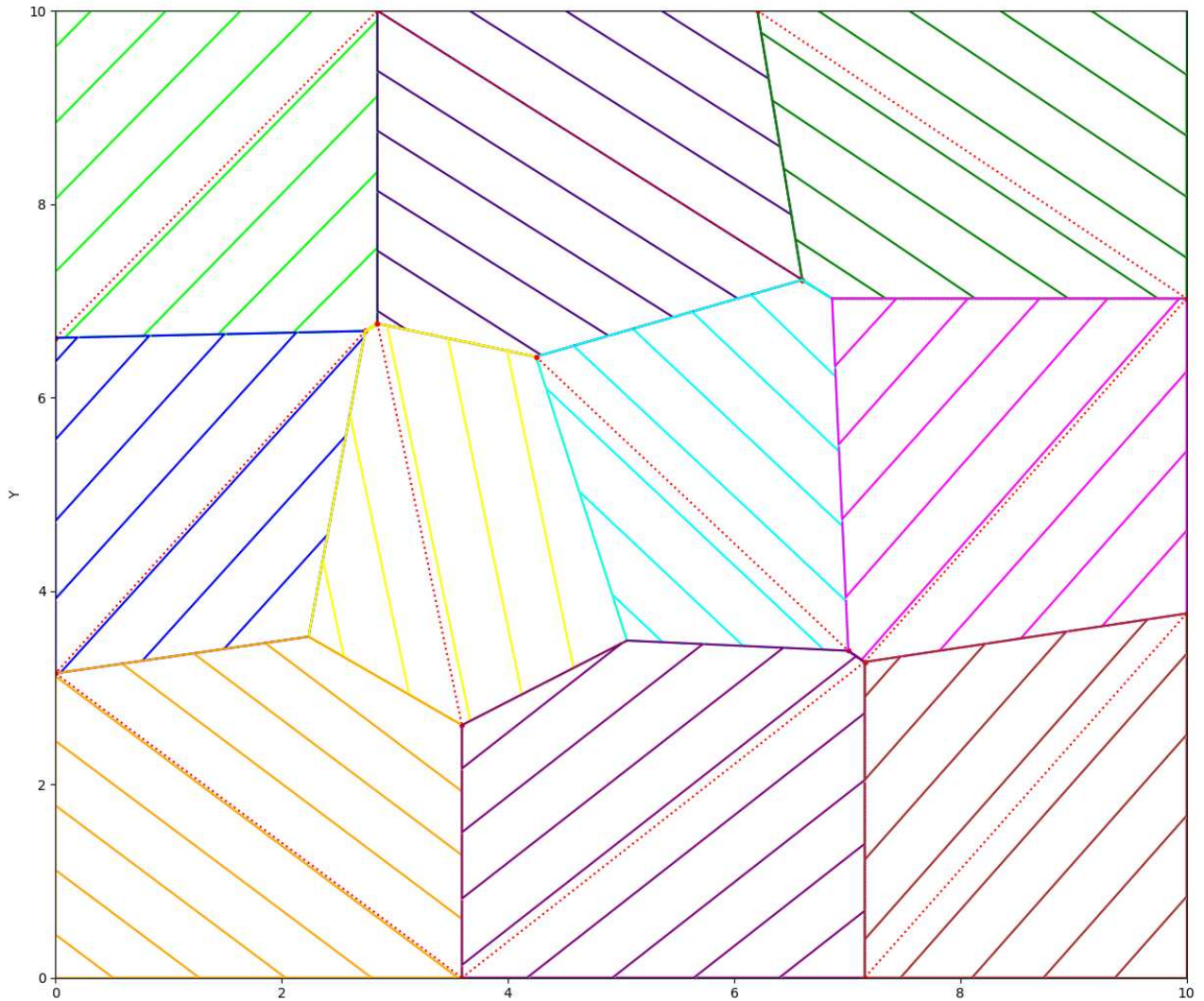


Рис. 4.8: Маршрути кожного дрону для покриття території

У першому експерименті було протестовано алгоритм покриття території на базовому сценарії з однорідним роєм дронів, де кожен сектор мав однаковий розмір. Алгоритм продемонстрував ефективність у покритті простої квадратної території з рівномірним розподілом ресурсів. Отримані результати підтвердили, що в умовах однорідного рою і простого простору алгоритм здатний забезпечити стабільне та оптимальне покриття.

4.2. Рій середнього розміру на території нестандартної форми

У другому експерименті буде проведена перевірка алгоритму покриття території роєм дронів на складнішому сценарії, де територія має нестандартну геометрію, а рій складається з більшої кількості різнотипних дронів. Для цього тестування було обрано кільцеподібну територію, яка складається з зовнішнього кільця радіусом 50 одиниць та внутрішнього еліпса з параметрами ширини 30 одиниць і висоти 70 одиниць. Така форма території забезпечує більш складний простір для моделювання адже частини з ширшими та вузкими розмірами. Вигляд території зображений на рисунку 5.9.

Рій складається з п'ятдесяти дронів трьох різних типів, кожен з яких здатний покривати територію радіусом [4, 6, 7.5] відповідно. Така різноманітність дронів дозволяє зосередитися на оцінці ефективності алгоритму в умовах гетерогенного рою, де кожен тип дрона має свої характеристики та можливості. Це тестування дозволяє перевірити, як алгоритм справляється із завданням покриття території, яка має складну форму і вимагає адаптації до різних розмірів дронів.

Цей експеримент надасть більш детальні дані щодо роботи алгоритму в умовах підвищеної складності та дозволить оцінити, як він масштабується і адаптується до різноманітних вимог покриття. Результати цього тестування будуть використані для оцінки ефективності алгоритму в умовах, що наближаються до реальних сценаріїв застосування.

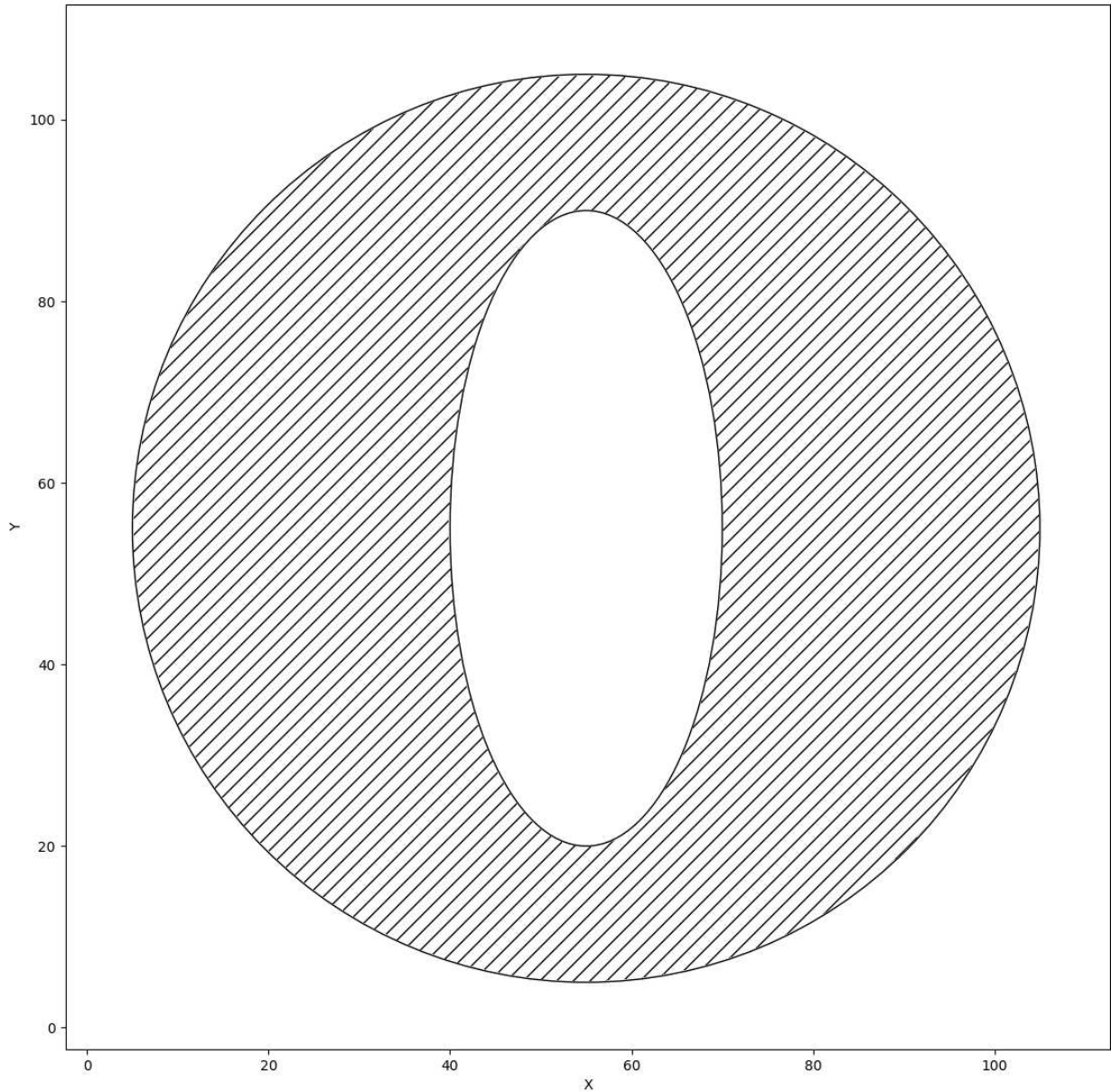


Рис. 4.9: Територія другого експерименту

4.2.1. Пошук початкових положень

Після визначення основних параметрів для першого експерименту, використовується генетичний алгоритм для знаходження оптимальних початкових позицій дронів. Початкові позиції генеруються випадковим чином для кожного дрона. Потім ці позиції оптимізуються за допомогою генетичного алгоритму, який враховує два основних критерії: максимізацію покриття те-

риторії та мінімізацію перекриття зон покриття окремих дронів.

Параметри генетичного алгоритму, використані для оптимізації покриття: розмір популяції становить 100, кількість поколінь - 1000, частка мутації - 10%, частка еліт кожного покоління - 10%.

Після проходження умов ГА були отримані наступні положення:

Дрон	X	Y	Дрон	X	Y
1	34.225967	93.732873	26	25.380168	49.098174
2	67.654253	25.463990	27	24.410750	37.555903
3	25.944253	85.757698	28	90.979616	84.712168
4	42.138214	99.140859	29	95.856466	37.950448
5	83.130986	86.344064	30	73.860390	98.133936
6	44.026406	23.616539	31	97.021262	70.104486
7	73.856837	33.065690	32	96.491176	78.404383
8	87.657672	28.834093	33	74.443367	44.265630
9	35.680910	15.941157	34	14.826221	67.392359
10	44.646521	88.414125	35	77.537269	18.960413
11	77.712102	65.195641	36	74.130168	75.857695
12	101.134679	64.817119	37	24.681077	24.329540
13	38.455640	80.069428	38	54.023289	97.273167
14	36.188177	67.836168	39	64.422681	98.305805
15	94.382686	47.220858	40	27.419298	74.561319
16	15.703237	31.263620	41	87.644102	75.149765
17	74.616572	56.551201	42	78.953446	92.629966
18	69.454031	87.189222	43	88.268771	63.739006
19	86.795676	51.638986	44	13.414275	40.642780
20	98.547109	55.916449	45	35.647840	42.205882
21	35.093544	54.732720	46	100.824805	47.048652
22	35.790639	29.935090	47	56.323915	9.503423
23	13.073663	52.381150	48	17.146256	79.151215
24	64.754060	14.941180	49	85.180743	40.774272
25	25.692203	60.843770	50	47.338291	13.535058

Табл. 4.3: Кінцеві положення дронів після оптимізації генетичним алгоритмом

На території покриття дані початкові положення виглядають наступним чином:

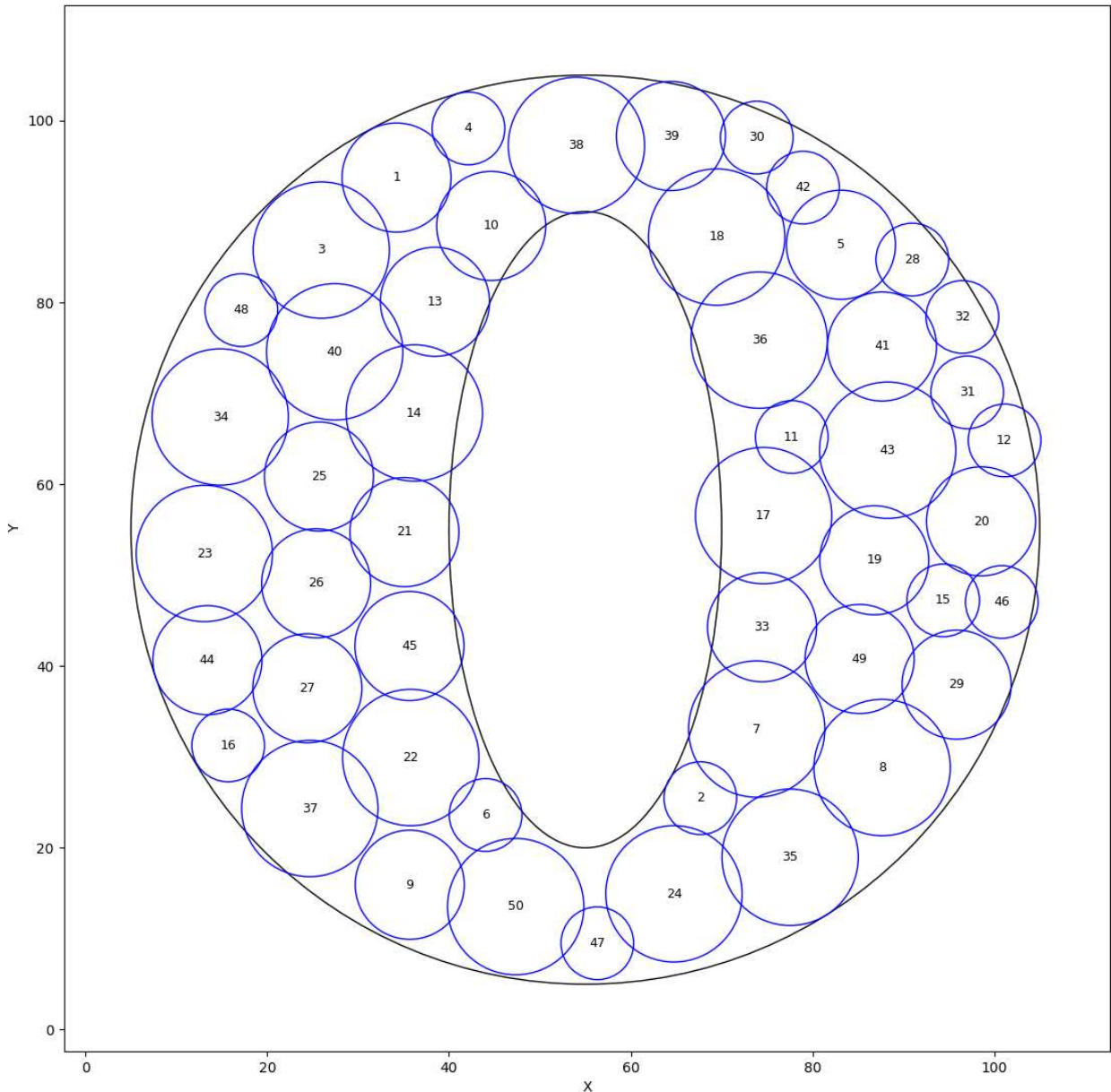


Рис. 4.10: Кінцеві положення дронів другого експерименту після оптимізації ГА

Як видно з рисунку 5.10, у процесі пошуку початкових положень для дронів у другому тестуванні генетичний алгоритм досяг результатів, що є наближеними до оптимальних і забезпечують ефективне покриття території. Зважаючи на складність території кільцеподібної форми та гетерогенність рою дронів, алгоритм показав гарну продуктивність. Хоча існує потенціал для подальшого вдосконалення алгоритму, результати цього етапу можуть

служувати основою для наступних пунктів алгоритму покриття території.

4.2.2. Розподіл території на окремі сектори

У другому експерименті, де територія має кільцеподібну форму, що складається з кола радіусом 50 та еліпса з шириною 30 і висотою 70, особливу увагу було приділено розподілу території на окремі сектори. Основна відмінність цього етапу порівняно з попереднім експериментом полягає в наявності гетерогенного рою дронів, де кожен дрон має різні характеристики і здатен покривати різні площі.

У першому експерименті рій складався з однорідних дронів, тому всі сектори мали однаковий розмір і вагу, що дозволило рівномірно розподілити територію. Проте в даному експерименті, з огляду на різну потужність і радіус покриття дронів трьох типів, необхідно було адаптувати розмір секторів до їхніх характеристик.

Кожен сектор був розрахований так, щоб відповідати можливостям конкретного типу дронів, з урахуванням їхніх максимальних радіусів покриття (4, 6, 7.5 одиниць відповідно). Територія була поділена на сектори таким чином, щоб кожен дрон міг оптимально використовувати свій радіус дії, не витрачаючи зайвих ресурсів і не створюючи перекриттів. Цей підхід дозволяє максимально ефективно використовувати потенціал кожного дрона та забезпечити рівномірне покриття складної території.

На рисунку 5.11 зображений результат розподілу території на окремі сектори під кожен дрон. Оскільки в даному експерименті були дрони з різними характеристиками, то результатом розподілу вже є повноцінна адитивно зважена діаграма Вороного, де розмір сектора відповідає можливостям дрона.

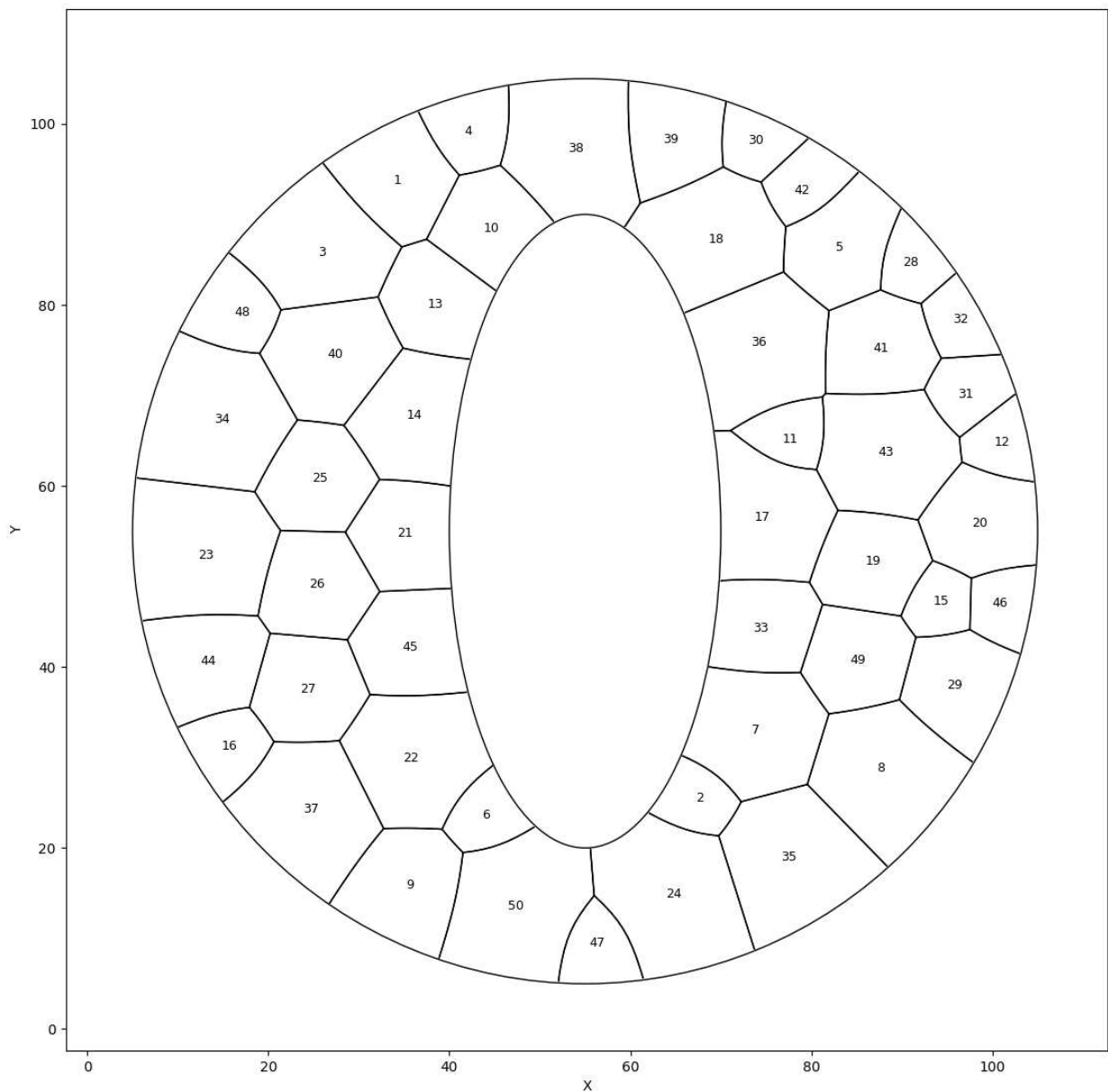


Рис. 4.11: Розподіл кільцеподібної території на сектори

Розподіл території на окремі сектори в другому експерименті був здійснений з урахуванням різноманітності характеристик дронів, що входять до складу рою. Завдяки адаптації розміру секторів до можливостей кожного типу дронів, вдалося забезпечити ефективний і раціональний розподіл території. Це дозволило максимально використовувати потенціал кожного дрона і забезпечити рівномірне покриття складної кільцеподібної території, що спри-

яє підвищенню загальної ефективності алгоритму. Такий підхід є критично важливим для успішного виконання задачі покриття в умовах гетерогенного рою, де різні дрони мають різні можливості. Результати цього етапу створили основу для подальшого тестування алгоритму, дозволяючи враховувати відмінності між дронами та забезпечити більш ефективно і точно покриття території.

4.2.3. Пошук маршруту покриття сектору кожним дроном

У даному пункті описується процес пошуку маршруту покриття сектору кожним дроном у другому тестуванні. Загальний підхід до цього процесу залишається аналогічним до першого експерименту, де основною метою було забезпечити ефективно покриття виділеного сектору кожним дроном з мінімальними витратами ресурсів. Єдина значна відмінність полягає у збільшеній кількості секторів, що обумовлено різними можливостями дронів та складнішою конфігурацією території у вигляді кільцеподібної форми.

Як і в першому експерименті, кожен дрон отримує свій сектор і відповідний маршрут, оптимізований для його характеристик. Алгоритм шукає найкращий маршрут, який дозволяє мінімізувати кількість розворотів і загальний час покриття території, що забезпечує максимально ефективно використання ресурсів кожного дрона.

Виконавши алгоритм пошуку маршруту для кожного сектору на території, отримуємо маршрути для кожного дрону, які повністю перекривають задану територію. Результат даного покриття зображений на рисунку 5.12 де кожен сектор виділений окремим кольором.

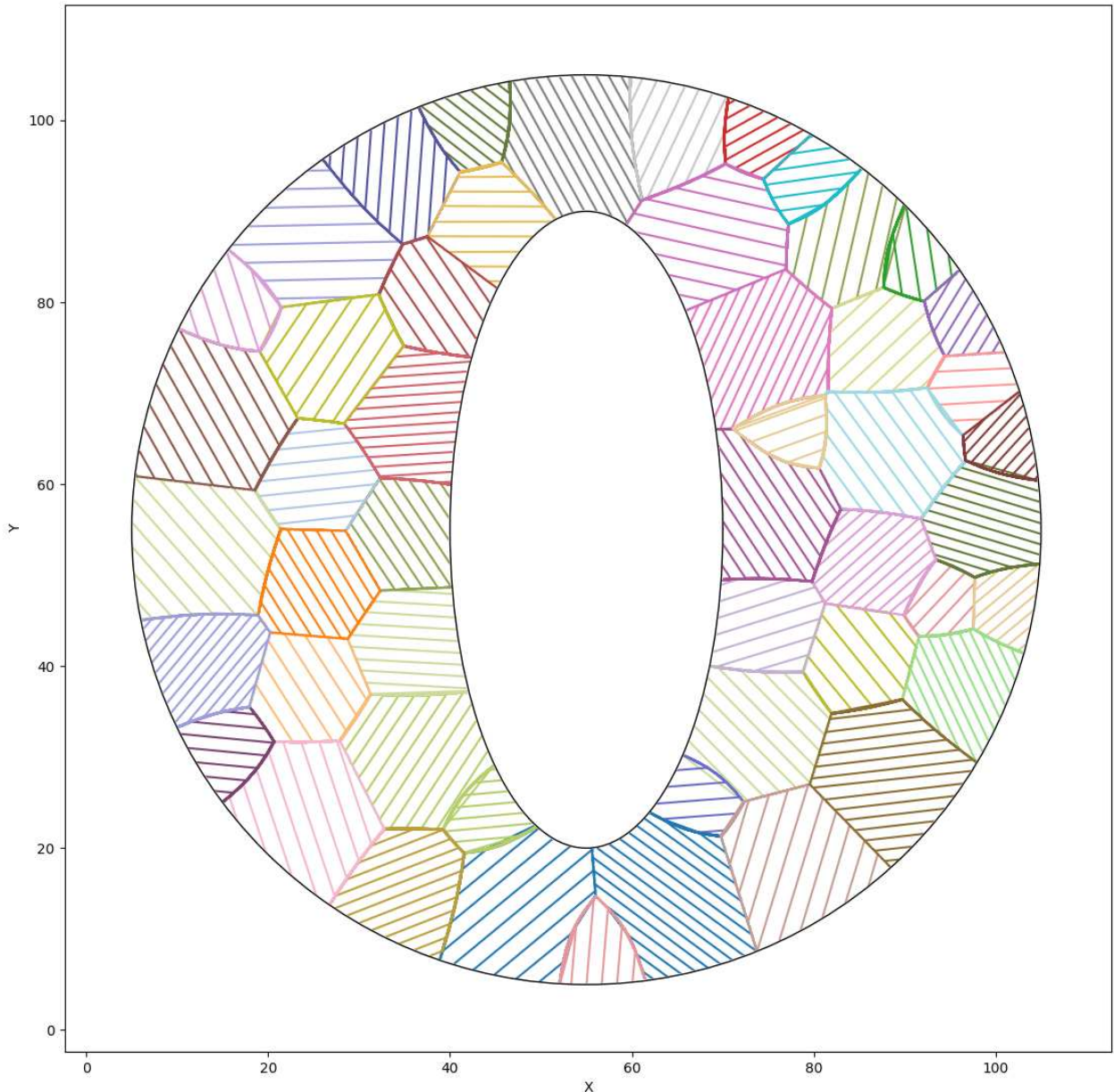


Рис. 4.12: Маршрути кожного дрону для покриття кільцеподібної території

У другому експерименті було розглянуто складніший сценарій з гетерогенним роєм дронів і кільцеподібною територією. Незважаючи на підвищену складність, алгоритм продемонстрував здатність адаптуватися до різних типів дронів і забезпечити ефективне покриття, відповідне їхнім можливостям. Хоча алгоритм не досяг повністю оптимального рішення, отримані результати були досить близькими до нього, що підтверджує здатність алгоритму

успішно виконувати завдання в умовах підвищеної складності та різноманітних вимог.

4.3. Великий гетерогенний рій на території зі складною геометрією

У третьому експерименті алгоритм покриття території роєм дронів буде перевірений на більш складному сценарії. Для цього обрана велика територія довільної форми, яка відрізняється від попередніх тестів своєю складністю та розмірами. Рій складається зі 100 дронів. Розміри території, яку може покрити кожен дрон, визначаються випадковим чином, що робить його значно більшим та гетерогенним порівняно з попередніми експериментами. Вигляд території зображений на рисунку 5.13.

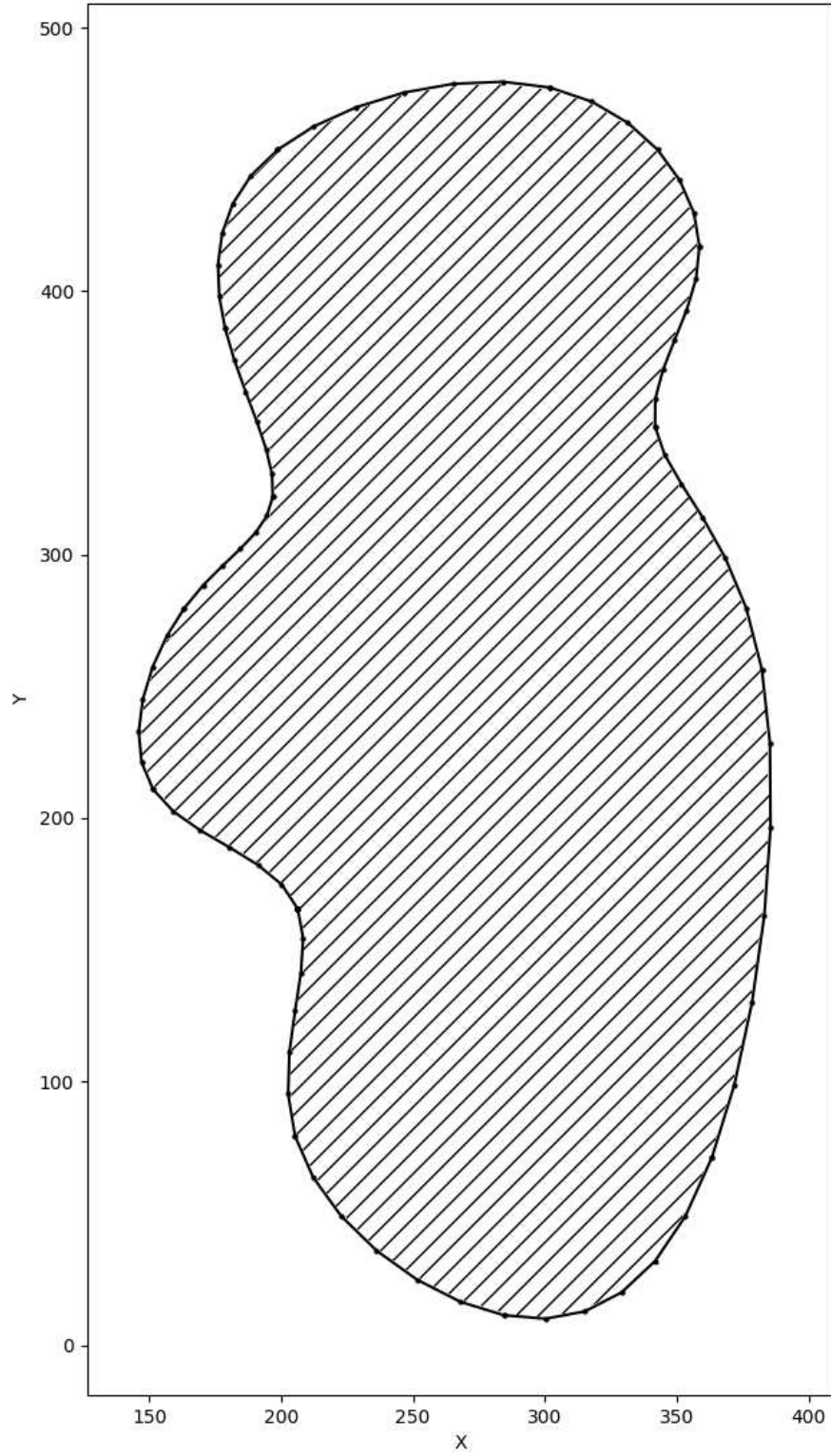


Рис. 4.13: Територія третього експерименту

4.3.1. Пошук початкових положень

Основні кроки алгоритму залишаються такими ж як і в попередніх тестах, після визначення основних параметрів для першого експерименту, використовується генетичний алгоритм для знаходження оптимальних початкових позицій дронів. Початкові позиції генеруються випадковим чином для кожного дрона. Потім ці позиції оптимізуються за допомогою генетичного алгоритму, який враховує два основних критерії: максимізацію покриття території та мінімізацію перекриття зон покриття окремих дронів.

Параметри генетичного алгоритму, використані для оптимізації покриття: розмір популяції становить 500, кількість поколінь - 2500, частка мутації - 10%, частка еліт кожного покоління - 10%.

На території покриття дані початкові положення виглядають наступним чином:

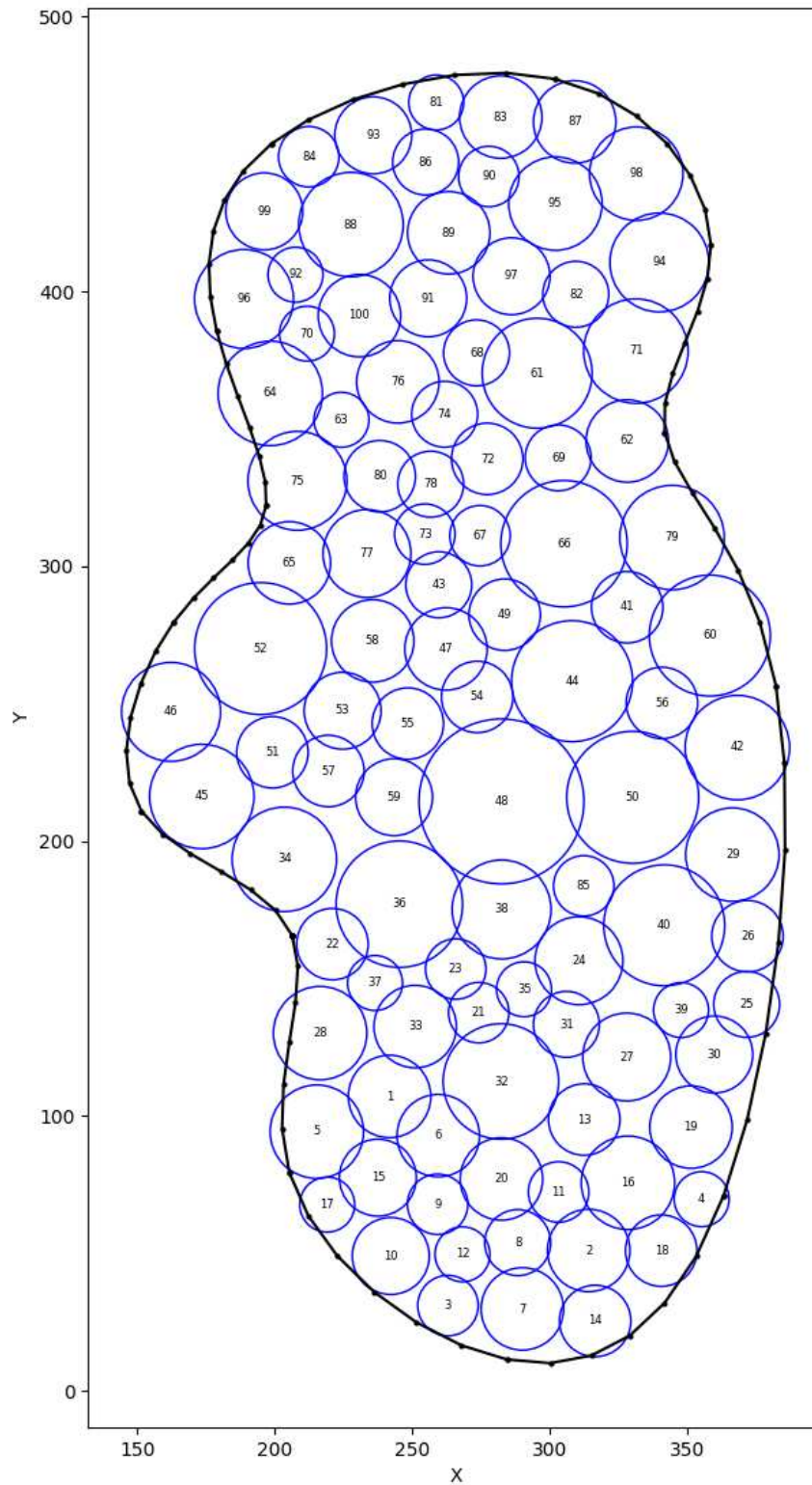


Рис. 4.14: Кінцеві положення дронів третього експерименту після оптимізації

Результатом генетичного алгоритму початкові позиції дронів, що максимізують покриття території та мінімізують перекреття між дронами.

4.3.2. Розподіл території на окремі сектори

Наступним кроком є розподіл території на окремі сектори відповідно до початкових положень. Адитивно зважена діаграма Вороного з результатом розподілу зображена на рисунку 5.16.

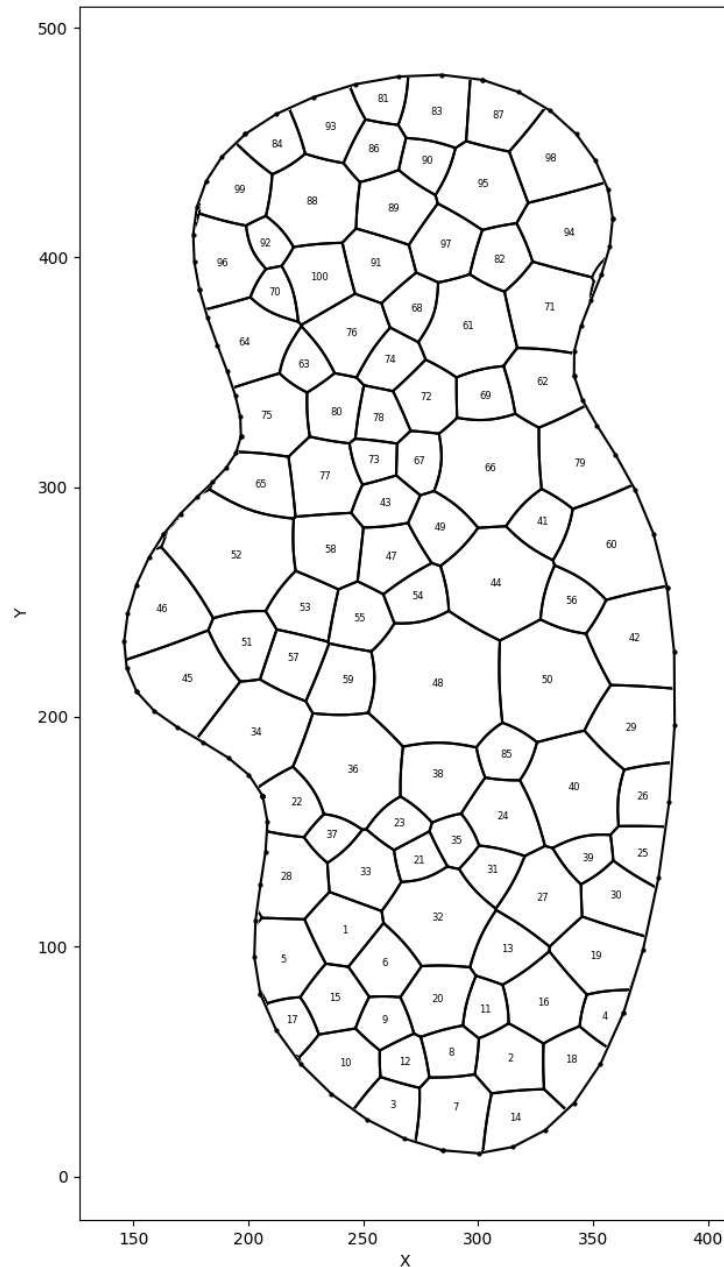


Рис. 4.15: Розподіл території на сектори

4.3.3. Пошук маршруту покриття сектору кожним дроном

Процесу пошуку маршруту покриття сектору кожним дроном залишається аналогічним до двох попередніх експериментів, де основною метою було забезпечити ефективне покриття виділеного сектору кожним дроном з мінімальними витратами ресурсів. Єдина значна відмінність полягає у збільшеній кількості секторів, що обумовлено різними можливостями дронів та складнішою конфігурацією території.

Виконавши алгоритм пошуку маршруту для кожного сектору на території, отримуємо маршрути для кожного дрону, які повністю перекривають задану територію. Результат даного покриття зображений на рисунку 5.16 де кожен сектор виділений окремим кольором.

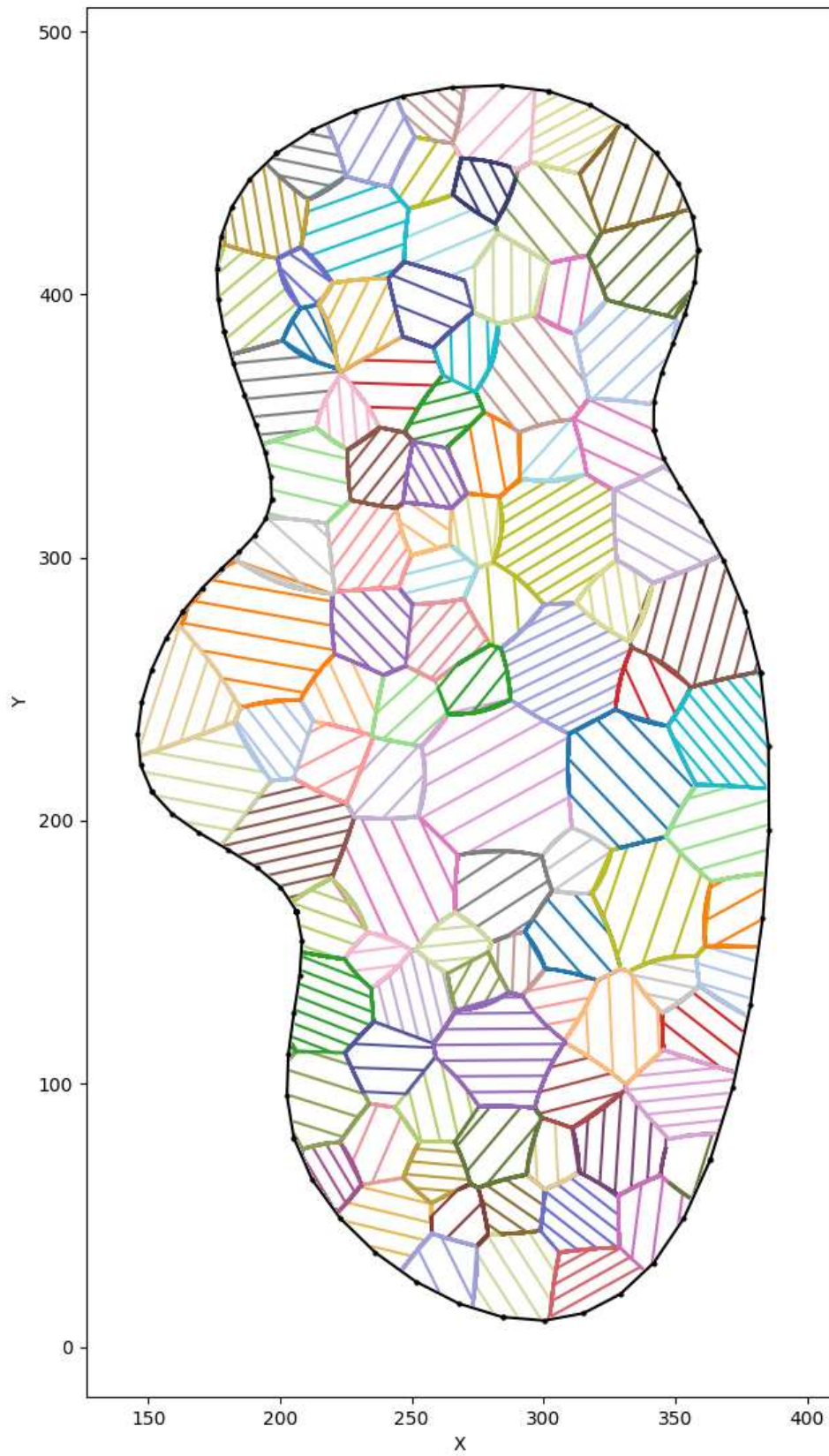


Рис. 4.16: Маршрути кожного дрону для покриття території

4.4. Тестування маршруту покриття сектору в симуляційному середовищі

У цьому пункті буде проведено тестування розробленого алгоритму покриття сектору у симуляційному середовищі з використанням програмного забезпечення PX4 Autopilot та QGroundControl. Мета цього тестування — перевірити працездатність створених маршрутів для покриття території, оцінити ефективність алгоритму у віртуальних умовах та виявити можливі недоліки або проблеми при виконанні місії дронами. Використання симуляційного середовища дозволить більш детально перевірити маршрути та провести експеримент в умовах, максимально наближених до реальних, без ризику втрати обладнання або інших ресурсів.

Для цієї перевірки був обраний сектор 48 з попереднього тестування. На рисунку 4.17 він вказаний у середовищі QGroundControl. У якості дрону буде використаний віртуальний дрон з утиліти PX4 Autopilot.

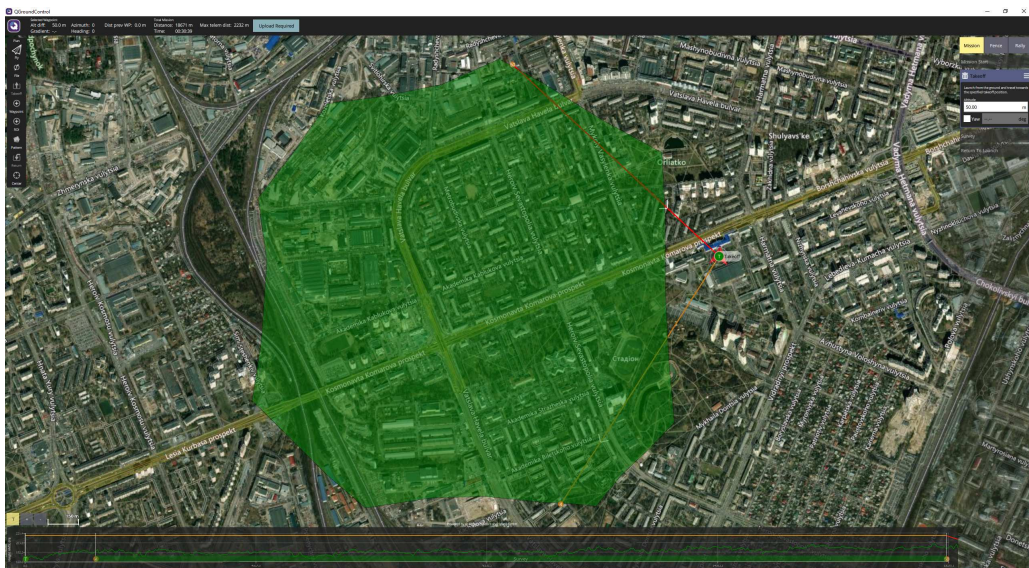


Рис. 4.17: Сектор території у середовищі QGroundControl

На рисунку 4.18 бачимо маршрут покриття сектору знайдений в попе-

редньому тестуванні.

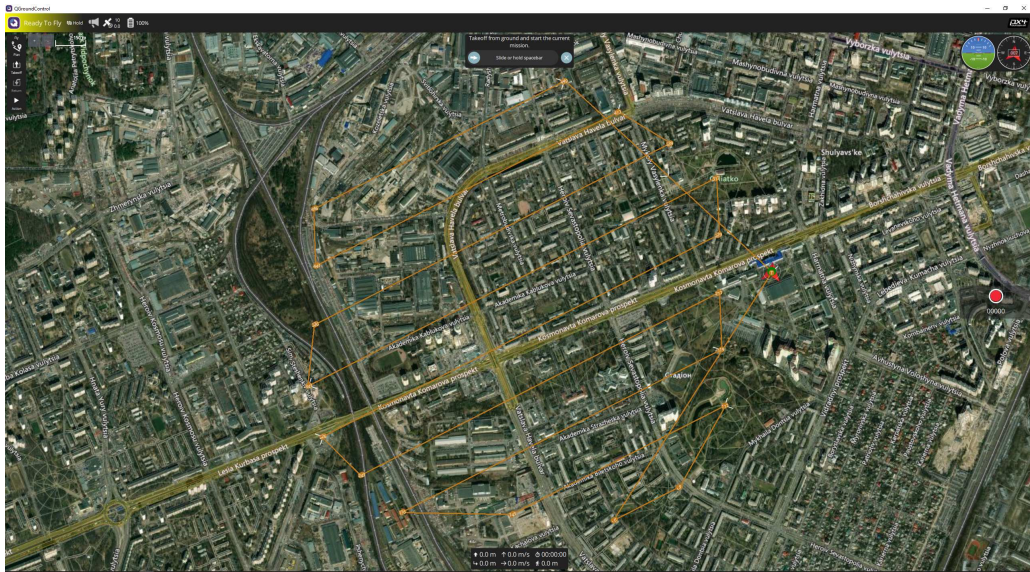


Рис. 4.18: Маршрут покриття території у середовищі QGroundControl

Запустивши виконання місії у QGroundControl можемо спостерігати за польотом дрона в реальному часі. На рисунках 4.19 та 4.20 зображений процес проходження маршруту. Пройдений маршрут відображений червоним кольором.

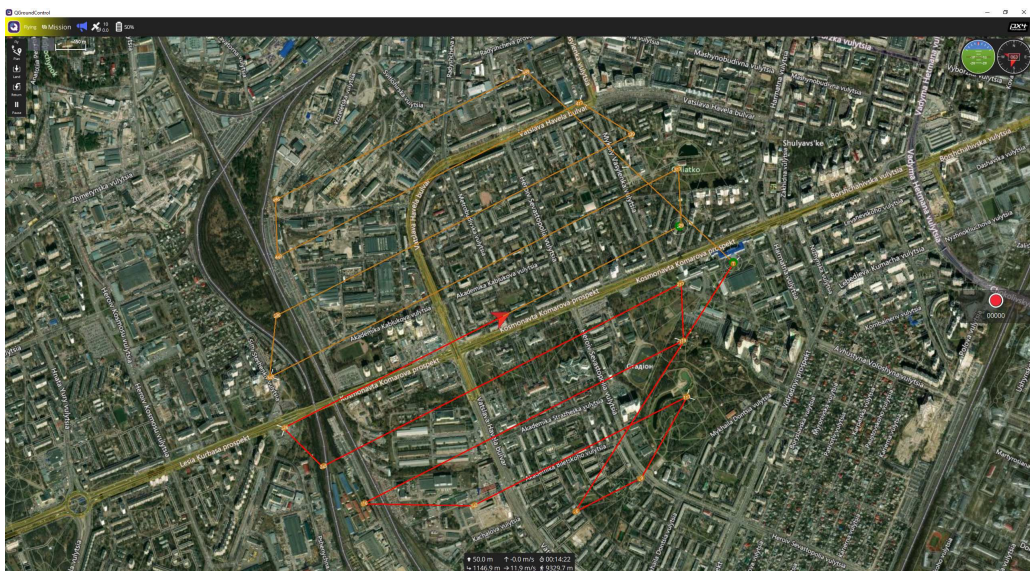


Рис. 4.19: Проходження маршруту покриття території

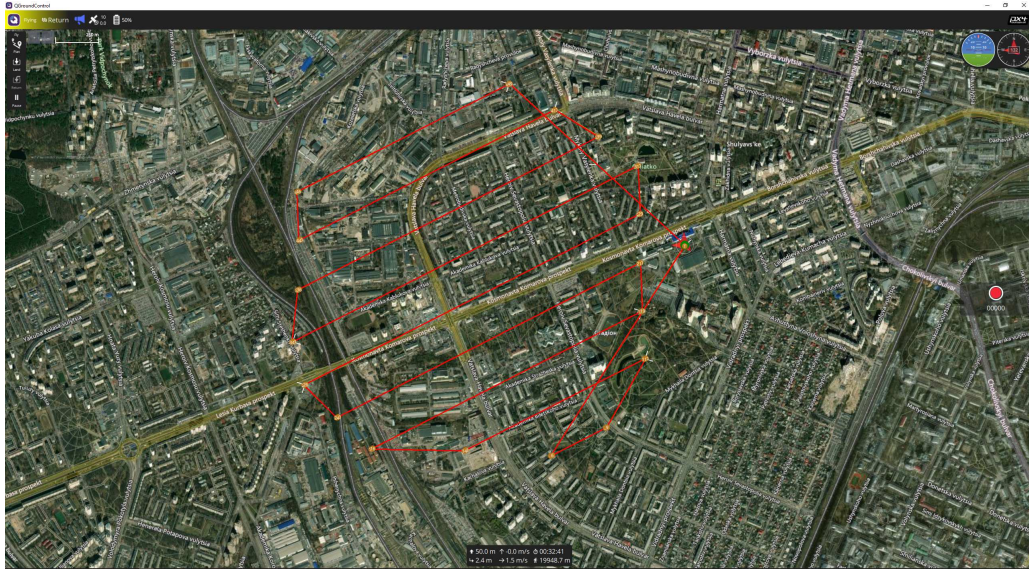


Рис. 4.20: Завершення маршруту покриття території

Як видно з попередніх матеріалів, тестування алгоритму у симуляційному середовищі підтверджують його ефективність та надійність у виконанні завдання покриття території. Використання програмного забезпечення PX4 Autopilot та QGroundControl дозволило ретельно перевірити роботу алгоритму в умовах, наближених до реальних. Дрон успішно виконав маршрут, покривши всю задану територію. Траєкторія польоту була оптимальною, а час виконання місії відповідав очікуванням. Результати тестування підтверджують можливість використання алгоритму в реальних умовах для моніторингу та виконання складних завдань з покриття територій.

4.5. Висновок до розділу

У даному розділі було проведено експериментальну перевірку алгоритмів покриття території роєм дронів на різних типах територій. Було розглянуто три сценарії: від простого з однорідним роєм на невеликій території до складних тестів із гетерогенними роями на територіях довільної форми. Кожен сценарій охоплював усі етапи роботи алгоритму — від пошуку поча-

ткових положень дронів до побудови оптимальних маршрутів для покриття секторів.

Отримані дані експериментальної перевірки будуть використані в наступному розділі для детального аналізу результатів, з метою визначення сильних та слабких сторін алгоритмів. Це дозволить розробити рекомендації щодо їх подальшої оптимізації та вдосконалення для підвищення ефективності покриття території роєм дронів у різних умовах.

РОЗДІЛ 5

Аналіз результатів перевірки алгоритму покриття території

У цьому розділі проводиться аналіз результатів, отриманих під час експериментальної перевірки алгоритмів покриття території роєм дронів. Аналіз ґрунтується на якісних і кількісних характеристиках, визначених у розділі методології. Основна увага приділяється таким кількісним показникам, як площа покриття, час виконання місії, кількість розворотів та мінімізація перекриттів між дронами. Крім того, розглянуто якісні характеристики, зокрема гнучкість та масштабованість алгоритмів в умовах різної складності території та гетерогенності рою.

Мета цього розділу — визначити ефективність алгоритмів у різних експериментальних умовах, виявити сильні сторони та недоліки запропонованих підходів, а також зробити висновки щодо можливих шляхів подальшого вдосконалення алгоритмів.

5.1. Аналіз кількісних характеристик

5.1.1. Аналіз площі покриття

У цьому підпункті розглядається ефективність генетичного алгоритму у вирішенні завдання пошуку початкових положень дронів для забезпечення максимально можливого покриття території. Одним із ключових критеріїв оцінки є відсоток території, перекритий початковими положеннями дронів після завершення оптимізації. Генетичний алгоритм має забезпечити таке розташування дронів, яке дозволяє рівномірно розподілити їх по території, мінімізуючи пропуски та невикористані зони. Аналіз показує, наскільки вдало алгоритм виконав це завдання, і які ділянки території залишилися не покритими або перекритими недостатньо. Результати аналізу представлені у

відсотковому співвідношенні території, що була покрита дронами після їхнього початкового розташування у таблиці 6.1.

№ Тестування	Відсоток
1	89.18068
2	88.25774
3	87.51592

Табл. 5.1: Відсоток покритої території початковими положеннями дронів

Аналіз результатів експериментів показує, що генетичний алгоритм демонструє високий рівень ефективності у пошуку початкових положень дронів для покриття території. У першому експерименті, на простій квадратній території з однорідним роєм дронів, алгоритм досяг найвищого показника покриття — 89.18068% території, що свідчить про вдало підібрані початкові положення і рівномірний розподіл дронів.

У другому експерименті, де використовувався гетерогенний рій на кільцеподібній території, рівень покриття знизився до 88.25774%. Це пояснюється складністю території та неоднорідністю можливостей дронів, що створило додаткові виклики для алгоритму. Проте, результат все одно вважається достатньо високим з огляду на умови тестування.

Третій експеримент на великій території довільної форми показав найнижчий результат покриття — 87.51592%. Цей показник вказує на те, що у випадках з більш складними територіями генетичний алгоритм стикається з труднощами у знаходженні початкових положень, які забезпечують оптимальне покриття. Незважаючи на це, отримані результати підтверджують, що алгоритм здатен адаптуватися до різних умов і забезпечувати достатній рівень покриття території навіть за умов значної гетерогенності рою.

5.1.2. Аналіз мінімізації перекриттів

У цьому підпункті оцінюється здатність генетичного алгоритму мінімізувати перекриття території дронами під час пошуку початкових положень. Перекриття виникають, коли двоє або більше дронів одночасно покривають одну і ту ж ділянку території, що призводить до неефективного використання ресурсів рою. Менший відсоток перекриттів означає, що алгоритм вдало розподілив початкові положення дронів, забезпечуючи рівномірне покриття без зайвих дублювань. Аналіз результатів допоможе оцінити, наскільки успішно алгоритм справляється з мінімізацією перекриттів і наскільки ефективним є його підхід до розподілу дронів по території. Результати аналізу представлені у відсотковому співвідношенні території, яка була перекрита двома або більше дронами після їхнього початкового розташування, у таблиці 6.2.

№ Тестування	Відсоток
1	7.03059
2	5.12201
3	4.53650

Табл. 5.2: Відсоток перекриттів між дронами

Аналіз результатів експериментів показує, що генетичний алгоритм продемонстрував здатність ефективно мінімізувати перекриття території декількома дронами після пошуку початкових положень. У першому експерименті, на простій квадратній території з однорідним роєм дронів, рівень перекриття склав 7.03059%. Це є досить високим показником у порівнянні з іншими експериментами, що можна пояснити простою конфігурацією території, де дрони мали більше можливостей дублювати покриття.

У другому експерименті, на кільцеподібній території з гетерогенним ро-

єм дронів, рівень перекриттів знизився до 5.12201%. Цей результат свідчить про те, що більш складна форма території та різноманітність характеристик дронів змусили алгоритм краще оптимізувати розподіл початкових положень, щоб уникнути надмірного перекриття.

У третьому експерименті, на великій території довільної форми, алгоритм досяг найнижчого показника перекриттів — 4.53650%. Це свідчить про те, що на складніших територіях генетичний алгоритм здатний ефективніше розподіляти дронів, мінімізуючи зайві перекриття і підвищуючи ефективність покриття. Загалом, результати показують, що алгоритм успішно справляється із завданням мінімізації перекриттів, особливо в умовах складних територій.

5.1.3. Аналіз відповідності розмірів секторів можливостям дронів

У цьому підпункті розглядається, наскільки ефективно алгоритм враховує можливості кожного дрона при розподілі території на сектори. Оптимальне співвідношення розміру сектору до можливостей дрона є критично важливим для забезпечення ефективного покриття території. Алгоритм має забезпечити таке розташування секторів, щоб кожен дрон покривав лише ту площу, яку він може обробити, уникаючи перевантаження або недостатнього використання своїх ресурсів. Аналіз дозволить оцінити, наскільки добре алгоритм справляється з цим завданням у різних експериментальних сценаріях, і чи відповідає розмір кожного сектору характеристикам дронів, зокрема їхньому радіусу покриття та енергетичним можливостям. Це дозволить виявити можливі недоліки в розподілі секторів і запропонувати шляхи для подальшого покращення.

Перше тестування

У першому тестуванні було проаналізовано відповідність реальних розмірів секторів, які отримали дрони, до оптимальних значень. На рисунку 6.1 продемонстровано відношення реальних розмірів секторів до оптимальних значень для кожного дрона. Це дозволяє візуально оцінити, наскільки близькими є отримані сектори до їхніх оптимальних розмірів, що є важливим критерієм для забезпечення ефективного використання можливостей дронів.

Для точнішого оцінювання відповідності розмірів секторів було також проведено аналіз відсоткових відхилень від оптимальних значень, представлений на рисунку 6.2. Цей аналіз дає змогу оцінити різницю між реальними та оптимальними розмірами секторів у відсотковому вираженні, що є більш гнучкою мірою для порівняння.

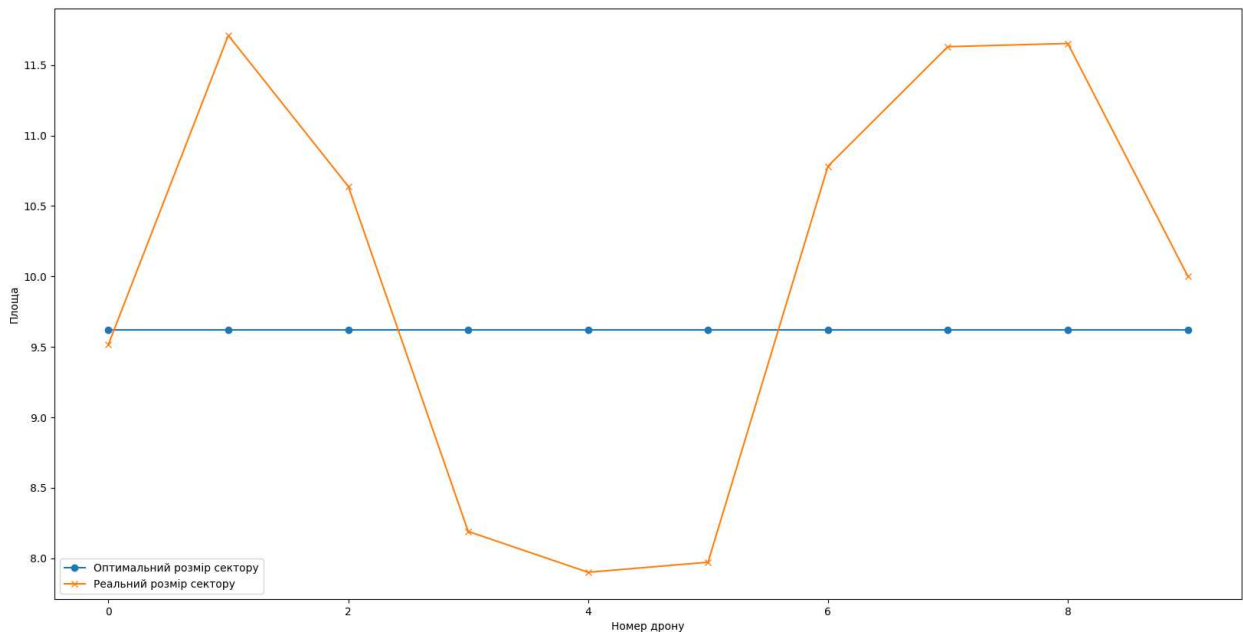


Рис. 5.1: Розміри секторів першого тестування

Відсоткові відхилення реальних розмірів секторів від оптимальних показали середнє абсолютне відхилення (MAD) реальних розмірів секторів від

оптимальних дорівнює 13.34066%. Хоча це відхилення не є критичним, його зменшення могло б сприяти кращій відповідності можливостей дронів їхнім секторам, що, у свою чергу, дозволило б підвищити ефективність покриття території.

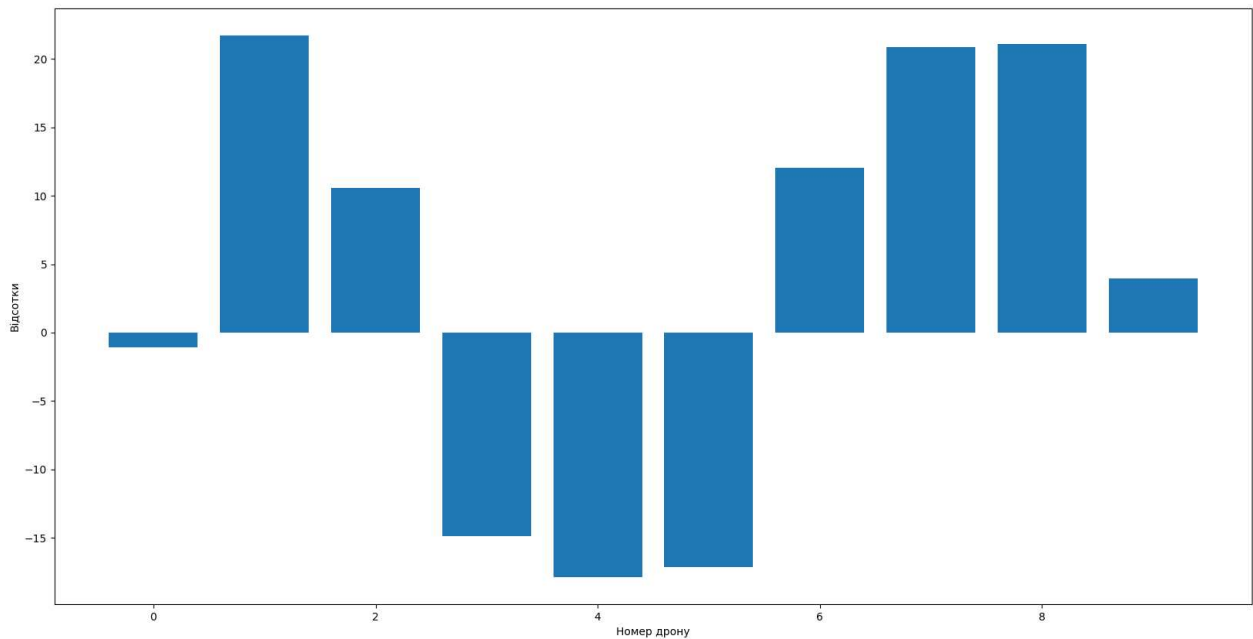


Рис. 5.2: Відсоткове відхилення

Друге тестування

Результати порівняння реальних та оптимальних розмірів для другого тестування та відсоткове відхилення подані на рисунках 6.3 та 6.4 відповідно. З рисунку 6.3 чітко видно співвідношення заданих можливостей дрона та розмірів секторів отриманих в ході алгоритму.

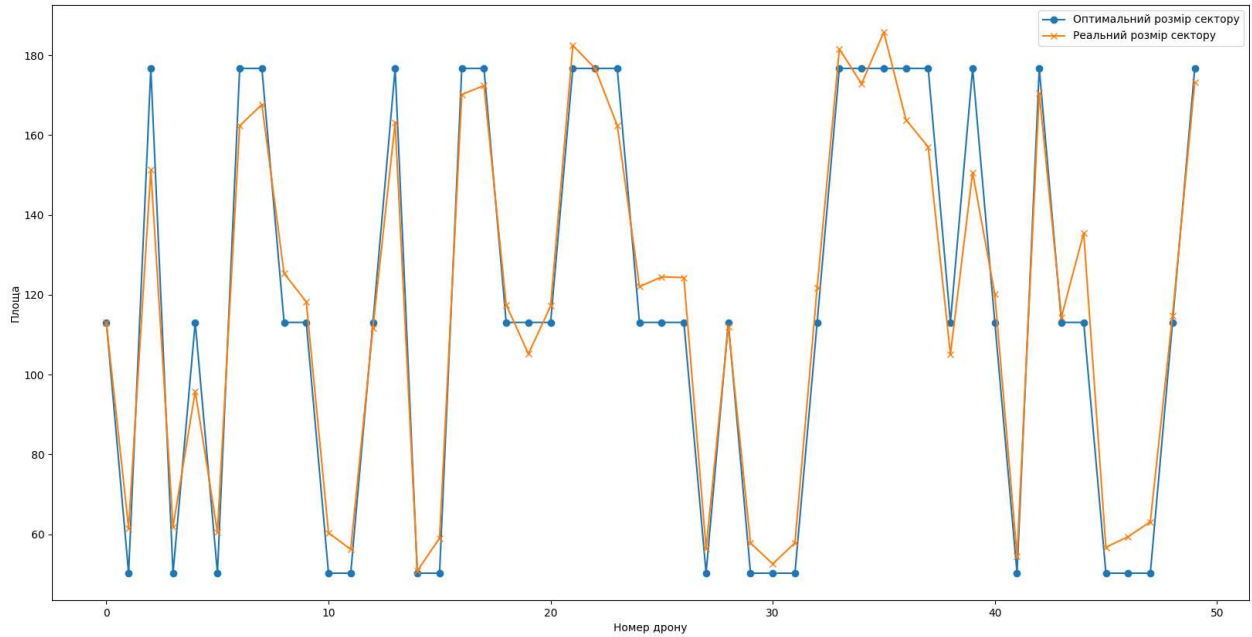


Рис. 5.3: Розміри секторів другого тестування

Середнє абсолютне відхилення відсоткових співвідношень між реальними та оптимальними розмірами секторів становить 8.61432%. Це означає, що в середньому реальні розміри секторів відхиляються від оптимальних на 8.61%. Хоча середнє відхилення і є доволі низьким, варто зазначити, що деякі сектори мали значно більші відхилення від оптимальних рішень, які досягали 22%. Незважаючи на ці окремі випадки, загальні результати другого тестування свідчать про те, що алгоритм добре справляється з розподілом секторів відповідно до можливостей дронів.

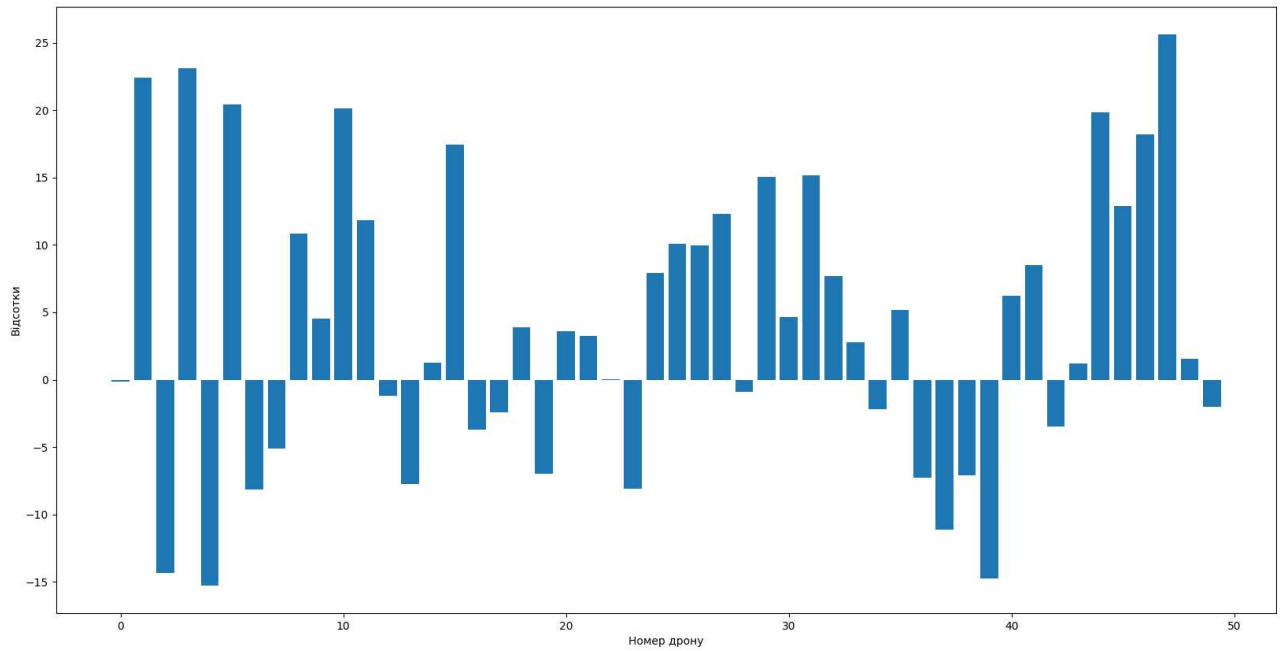


Рис. 5.4: Відсоткове відхилення

Третє тестування

Результати порівняння реальних та оптимальних розмірів для другого тестування та відсоткове відхилення подані на рисунках 6.5 та 6.6 відповідно. Прослідковується аналогічна ситуація з попереднім тестуванням, на рисунку 6.5 чітко видно співвідношення заданих можливостей дрона та розмірів секторів отриманих в ході алгоритму.

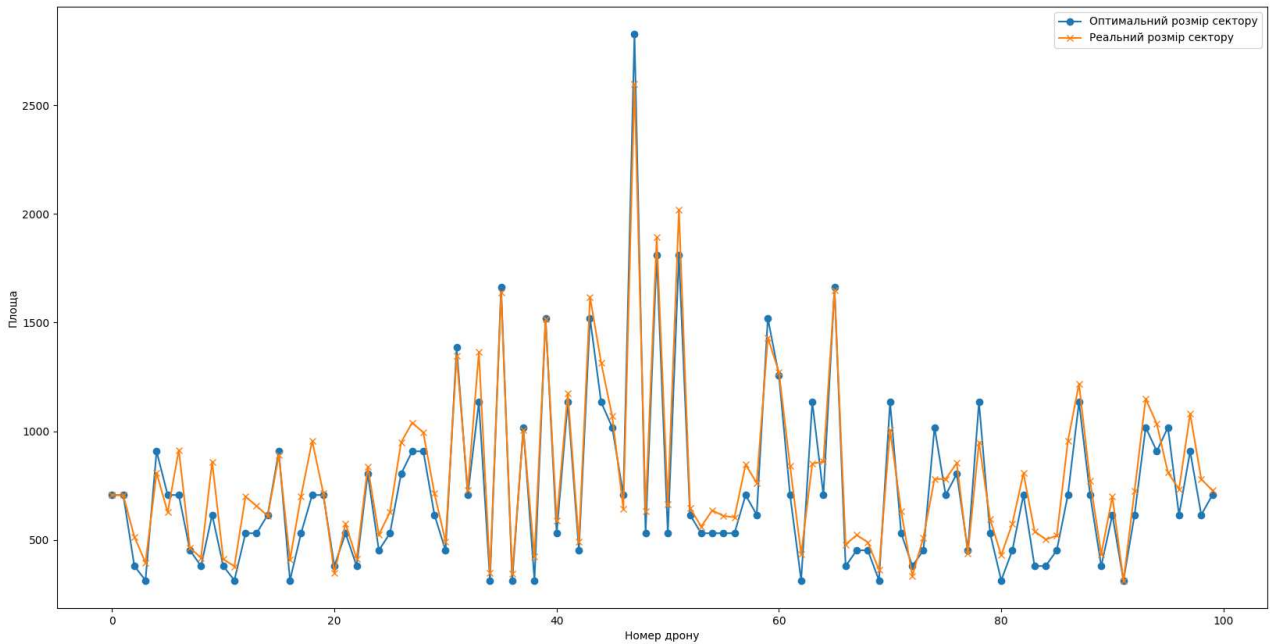


Рис. 5.5: Розміри секторів третього тестування

У третьому тестуванні середнє абсолютне відхилення відсоткових співвідношень між реальними та оптимальними розмірами секторів склало 11.20540%, що є допустимим результатом, але вказує на деякі потенційні недоліки в роботі алгоритму.

Однак, варто звернути увагу на окремі випадки, де відхилення досягали 40%. Ці значні відхилення спостерігалися здебільшого на межі території, що може бути ознакою того, що алгоритм має труднощі з точним розподілом секторів у цих зонах. Така ситуація вказує на можливе місце для подальшої оптимізації алгоритму, щоб покращити відповідність розмірів секторів можливостям дронів на крайніх ділянках.

Незважаючи на ці проблемні випадки, загальний результат тестування є позитивним. Більшість секторів були розподілені з достатньою точністю, що підтверджується середнім відхиленням. Алгоритм добре справляється з розподілом території, але є можливість для подальшого вдосконалення, зокрема

щодо обробки секторів на межі території.

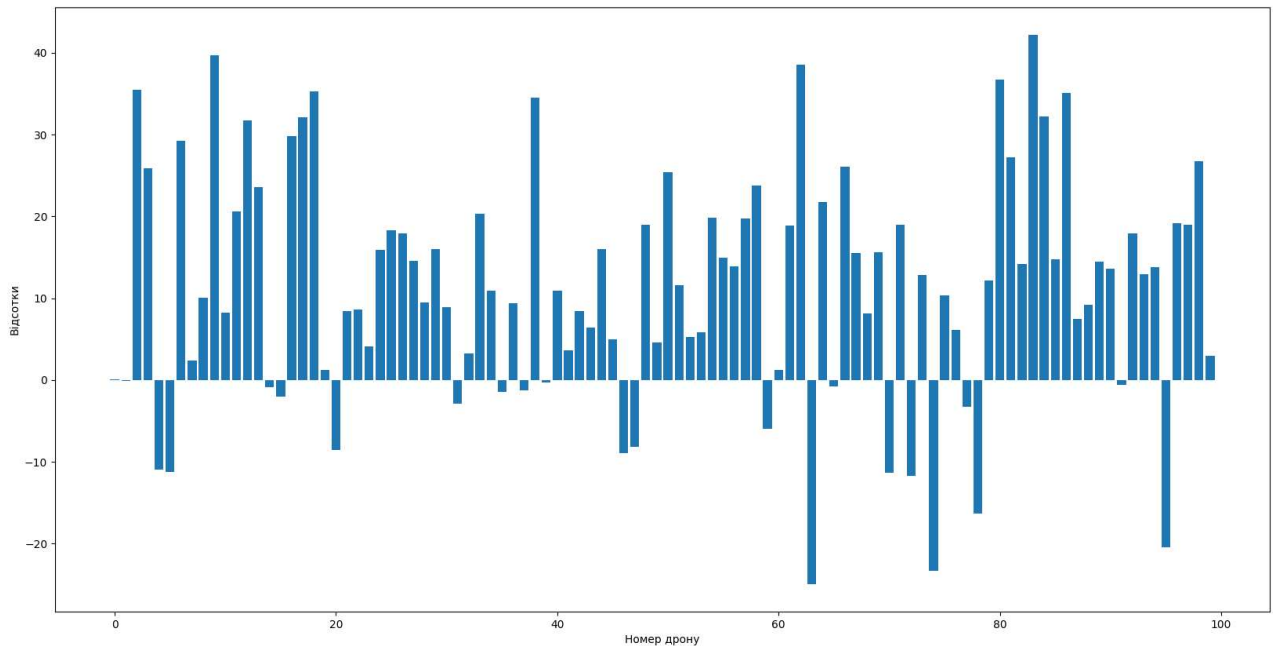


Рис. 5.6: Відсоткове відхилення

5.2. Аналіз якісних характеристик

У цьому розділі проводиться аналіз якісних характеристик алгоритму покриття території роєм дронів, які були визначені в розділі методології. Зокрема, розглядаються такі важливі аспекти, як гнучкість алгоритму та його здатність адаптуватися до різних умов місії, а також масштабованість — можливість ефективної роботи алгоритму на територіях різної складності та з роями дронів різного розміру. Якісні характеристики алгоритму є важливими для оцінки його практичної ефективності та потенціалу для використання в реальних умовах. Цей аналіз дозволяє визначити сильні та слабкі сторони алгоритму з точки зору адаптивності та універсальності.

5.2.1. Гнучкість алгоритму

Однією з ключових якісних характеристик, що визначає ефективність алгоритму покриття території роєм дронів, є його гнучкість. Ця характери-

стика відображає здатність алгоритму підлаштовуватися під різні критерії, такі як форма території та конфігурація рою, а також забезпечувати оптимальне покриття території в умовах різної складності. У межах експериментальних перевірок алгоритм було протестовано на різних формах територій і з різними конфігураціями роїв, що дозволило зробити висновки про рівень його гнучкості.

Перший сценарій передбачав роботу алгоритму на території з простою геометрією — квадратною ділянкою. Ця територія не створювала значних викликів для алгоритму, оскільки мала симетричну форму, що полегшувало розподіл секторів і побудову маршрутів. У цьому випадку алгоритм показав високу ефективність, оскільки форма території була оптимальною для базової версії алгоритму. Рій дронів у цьому тестуванні був однорідним, тобто всі дрони мали однакові можливості, що також сприяло простоті вирішення задачі. Гнучкість алгоритму в цьому випадку не була перевірена повною мірою через низьку складність завдання.

Наступний експеримент був проведений на території кільцеподібної форми, що ускладнило задачу розподілу секторів і вимагало більш адаптивного підходу. Алгоритму довелося враховувати нестандартну форму ділянки, що вимагало точнішого розрахунку секторів, щоб уникнути зайвих перекриттів та пропусків. У цьому випадку рій складався з кількох типів дронів, кожен з яких мав різні можливості щодо покриття площі. Така гетерогенність рою підвищила складність завдання, оскільки алгоритму потрібно було не лише ефективно розподілити сектори на нестандартній території, але й підлаштувати їх під можливості кожного типу дронів. Результати експерименту показали, що алгоритм успішно адаптується до складніших форм територій і

здатен забезпечити оптимальне покриття навіть у таких умовах.

Третій експеримент включав роботу на території довільної форми, яка не підпорядковувалася жодним геометричним правилам. Це була одна з найбільш складних територій, оскільки кожен сектор мав суттєво відрізнитися за розміром і формою, що вимагало від алгоритму максимального рівня адаптивності. Крім того, рій у цьому тестуванні був повністю гетерогенним — він складався з дронів з різними можливостями та характеристиками покриття. У таких умовах алгоритм повинен був не лише адаптуватися до нерегулярної форми території, але й забезпечити, щоб кожен дрон отримав сектор, відповідний його характеристикам.

Результати третього експерименту показали, що алгоритм демонструє високий рівень гнучкості навіть за таких умов. Незважаючи на складність форми території та гетерогенність рою, алгоритм зміг забезпечити достатньо ефективне покриття території. Однак були виявлені деякі недоліки, особливо щодо секторів на межі території, де відхилення від оптимальних розмірів були значними. Це вказує на те, що алгоритм має певні межі своєї адаптивності, але загалом демонструє здатність підлаштовуватися під різні типи завдань та умови.

Отже, аналіз гнучкості алгоритму показує, що він здатен адаптуватися до різних критеріїв, таких як форма території та конфігурація рою дронів. Алгоритм продемонстрував високу ефективність на територіях простої та середньої складності, таких як квадратні та кільцеподібні ділянки, а також на складних територіях довільної форми. Що стосується рою дронів, алгоритм показав здатність працювати з однорідними роєм, роями з кількома типами дронів та повністю гетерогенними роями. Незважаючи на це, алгоритм по-

требує подальшого вдосконалення для підвищення ефективності на межах територій та в умовах крайньої гетерогенності рою.

5.2.2. Масштабованість алгоритму

Масштабованість алгоритму є однією з ключових якісних характеристик, яка відображає здатність алгоритму ефективно працювати з різними розмірами території та роїв дронів. Важливим аспектом цього показника є те, наскільки добре алгоритм підлаштовується до змін розмірів території, зокрема при збільшенні або зменшенні її площі, а також здатність алгоритму працювати з різними кількостями дронів у рої та їхніми можливостями. У ході тестувань алгоритм було перевірено на трьох основних типах територій: невеликих, середніх і великих, а також з роями дронів різних розмірів і характеристик.

У першому експерименті було протестовано роботу алгоритму на невеликій квадратній території, розміром 10×10 , з роєм, який складався з 10 однакових дронів. Такий сценарій дозволив оцінити базову масштабованість алгоритму в умовах невеликої площі, де не потрібно значної варіативності у побудові секторів. Алгоритм продемонстрував високу ефективність на цьому етапі, оскільки всі дрони мали однакові можливості, а розмір території був невеликим. Завдяки цьому алгоритм швидко та точно розподілив сектори між дронами, мінімізуючи можливі пропуски або перекриття.

Наступний етап передбачав тестування алгоритму на середній за розміром кільцеподібній території. У цьому випадку рої складався з 50 дронів трьох різних типів, кожен з яких мав різні можливості щодо покриття площі. Територія мала складнішу форму, що вимагало від алгоритму адаптації не лише до різних характеристик дронів, але й до більшого розміру території.

Масштабованість алгоритму в таких умовах перевірялася за його здатністю ефективно розподіляти сектори між дронами з різними можливостями. У цьому випадку алгоритм показав гарну здатність до масштабування, адже зміг адаптуватися до збільшеної площі, хоча в деяких випадках відхилення від оптимальних розмірів секторів все ж таки виникали. Проте загальний результат показав, що алгоритм ефективно масштабується для роботи з середніми за розміром територіями та гетерогенними роями дронів.

Останній експеримент був найбільш масштабним і передбачав роботу алгоритму на великій території довільної форми з роєм, що складався зі 100 дронів різних розмірів і можливостей. Територія була дуже складною за формою, що вимагало від алгоритму максимального рівня адаптивності та точності при розподілі секторів. Крім того, гетерогенність рою значно ускладнювала завдання, оскільки кожен дрон мав різний радіус покриття, і алгоритму потрібно було знайти баланс між їхніми можливостями. Масштабованість алгоритму на цьому етапі була перевірена через здатність працювати з такою великою кількістю дронів і територією значної площі. Результати показали, що алгоритм може ефективно працювати і на великій території, хоча відхилення на межах території все ж таки залишалися, а також спостерігались випадки перекриття секторів, особливо для дронів з більшими можливостями покриття.

Варто зазначити, що масштабованість алгоритму демонструє гарні результати як на невеликих, так і на великих територіях, хоча збільшення площі та кількості дронів у рої призводить до певних викликів. Алгоритм показав здатність адаптуватися до різних розмірів території та роїв дронів без суттєвої втрати ефективності, однак у випадку з дуже великими територіями

та роями з високою гетерогенністю виникають певні недоліки, які потребують подальшого вдосконалення. Зокрема, слід звернути увагу на зменшення перекриття секторів і підвищення точності розподілу для дронів з різними можливостями покриття.

Отже, проведені тестування показали, що алгоритм є достатньо масштабованим і може працювати з різними розмірами територій та роїв дронів. Він продемонстрував високу ефективність на малих і середніх територіях, а також здатність до масштабування для роботи з великими площами, хоча при цьому виникають певні виклики у випадку з високою складністю форми території та гетерогенністю рою дронів.

5.3. Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено детальний аналіз результатів експериментальної перевірки алгоритмів покриття території роєм дронів на основі трьох різних сценаріїв, що відрізнялися розміром рою, складністю території та гетерогенністю дронів. Основною метою аналізу було визначення ефективності алгоритмів, їх здатності виконувати поставлені завдання у різних умовах.

Перший експеримент охоплював тестування алгоритму на простій території з однорідним роєм дронів, що дозволило оцінити базові можливості алгоритму в умовах відсутності складних факторів. Другий експеримент був проведений на кільцеподібній території середньої складності, з роями різних типів дронів, що дозволило перевірити адаптивність алгоритму до гетерогенних умов. У третьому експерименті алгоритм був протестований на складній території довільної форми з великим роєм дронів, що включав дрони з різними характеристиками.

Результати аналізу продемонстрували, що алгоритм демонструє хороші показники ефективності при роботі з різними типами роїв та територій. Однак, було виявлено кілька суттєвих недоліків. Зокрема, алгоритм має труднощі з оптимізацією розподілу секторів на краях території та не забезпечує реагування на динамічні зміни, такі як втрата дронів чи поява нових перешкод. Також існують обмеження в роботі алгоритму у складних ландшафтних умовах, де не враховується рельєф території або фізичні перешкоди.

Отримані результати та висновки будуть використані для подальшого вдосконалення алгоритму, де буде запропоновано конкретні заходи для підвищення продуктивності та адаптивності алгоритму до складніших умов.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання даної наукової роботи було досягнуто кілька важливих науково-практичних результатів, які значно розширюють можливості ефективного покриття території роєм безпілотних літальних апаратів. Результати проведених досліджень підтвердили високу ефективність запропонованого алгоритму в різних умовах та для різних типів роїв.

Перш за все, було успішно розроблено алгоритм генетичної оптимізації для визначення початкових положень дронів у рої. Цей алгоритм дозволяє ефективно розподілити рій дронів на початковій фазі місії таким чином, щоб мінімізувати витрати енергії під час виконання завдання. Запропонований підхід продемонстрував високу гнучкість і можливість адаптації до різних сценаріїв покриття території. Експериментальні результати підтвердили, що генетичний алгоритм дозволяє забезпечити оптимальне або наближене до оптимального розміщення дронів на початковій стадії, що суттєво знижує потребу в корекціях під час виконання місії.

Другою важливою складовою є алгоритм поділу території на сектори відповідно до можливостей кожного дрона. Запропонований алгоритм враховує габарити та характеристики кожного дрона в рої, дозволяючи рівномірно розподілити навантаження на всі дрони. Це забезпечило ефективне покриття території без надмірних перекриттів та зменшило кількість пропущених зон. Особливо важливою стала здатність алгоритму адаптуватися до роїв з гетерогенними характеристиками дронів, що дозволяє ефективно використовувати дрони з різними можливостями.

Третім значущим досягненням є перевірка алгоритму в трьох різних тестових сценаріях, які варіювалися за складністю та конфігурацією території.

У першому сценарії, з використанням однорідного рою на простій квадратній території, алгоритм продемонстрував високу точність покриття та ефективність у мінімізації кількості розворотів. У другому сценарії, де рій був гетерогенним, а територія мала складну форму, алгоритм продемонстрував гнучкість і адаптивність до зміненої геометрії та характеристик рою. У третьому сценарії, що включав великий гетерогенний рій дронів на складній території, алгоритм показав стабільну роботу, хоча й були виявлені деякі обмеження у покритті складних територій на межі області.

Результати експериментального тестування підтвердили високу ефективність алгоритму у випадку статичних умов, коли середовище не змінюється під час виконання місії. Алгоритм демонструє високу швидкість обчислення і здатність працювати з великими роями дронів у короткі терміни, що робить його придатним для реальних додатків у сфері моніторингу та розвідки.

Однак, під час роботи були виявлені і деякі недоліки. Найсуттєвішими з них є високе обчислювальне навантаження при роботі з великими роями та складність у розподілі секторів у випадку територій складної геометрії. Крім того, алгоритм поки що не передбачає реакцію на динамічні зміни в середовищі, такі як втрата дрона або поява нових перешкод. Це є суттєвим недоліком для реальних умов експлуатації дронів, коли подібні зміни можуть бути поширеними.

На основі отриманих результатів, у подальших дослідженнях передбачається працювати над подальшою оптимізацією алгоритму, зокрема над зниженням обчислювальної складності та інтеграцією динамічної адаптації до змін середовища. Окрему увагу буде приділено питанням врахування енергетичних витрат дронів, що дозволить ще більше підвищити ефективність

алгоритму в реальних умовах. Дослідження також продовжуватимуться в напрямку забезпечення покриття територій зі складними ландшафтними умовами, зокрема за допомогою впровадження тривимірних моделей місцевості та адаптивних маршрутів для дронів.

Загалом, отримані результати свідчать про високу ефективність запропонованого алгоритму та його придатність до практичного використання. Розроблені рішення мають великий потенціал для застосування в різних сферах, що вимагають автоматизованого моніторингу та розвідки території за допомогою рою БПЛА.

ДОДАТОК А
ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ
ПОЧАКОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ДРОНІВ ГЕНЕТИЧНИМ
АЛГОРИТМОМ

```
def calculate_fitness_parallel(population, radii):
    fitness_values = [None] * len(population)
    with concurrent.futures.ThreadPoolExecutor() as executor:
        future_to_index = {executor.submit(calculate_fitness, c, radii): i for i, c in
enumerate(population)}
        for future in concurrent.futures.as_completed(future_to_index):
            index = future_to_index[future]
            try:
                fitness = future.result()
                fitness_values[index] = fitness
            except Exception as exc:
                print(f'An error occurred at index {index}: {exc}')
    return fitness_values

def create_child(parent1, parent2, radii, points, alpha, mutation_rate):
    child = np.array([
        [alpha * parent1[i][0] + (1 - alpha) * parent2[i][0],
        alpha * parent1[i][1] + (1 - alpha) * parent2[i][1],
        radii[i]]
        for i in range(len(parent1))
    ])
    for i in range(len(child)):
        if random.random() < mutation_rate:
            new_point = generate_point_in_polygon_with_distance(sector, 0)
            child[i][0] = new_point[0]
            child[i][1] = new_point[1]
        elif not is_point_in_polygon(child[i][0], child[i][1], sector):
            new_point = generate_point_in_polygon_with_distance(sector, 0)
            child[i][0] = new_point[0]
            child[i][1] = new_point[1]
    return child.tolist()

def create_population(elites):
    new_population = []
    with ThreadPoolExecutor() as executor:
        while len(new_population) < population_size - len(elites):
```

```

    parent1, parent2 = random.choices(elites, k=2)
    child = executor.submit(create_child, parent1, parent2, radii, points,
random.uniform(0.1, 0.9), mutation_rate)
    new_population.append(child.result())
return new_population

```

```

def evolve_population(population):
    fitness_values = [calculate_fitness(c, radii) for c in population]
    num_tournaments = int(len(population) * elite_ratio)
    tournament_size = len(population) // num_tournaments
    indices = np.arange(len(population))
    np.random.shuffle(indices)
    shuffled_population = [population[i] for i in indices]
    shuffled_fitness = [fitness_values[i] for i in indices]
    elites = []
    for i in range(num_tournaments):
        start = i * tournament_size
        end = start + tournament_size
        group = shuffled_population[start:end]
        group_fitness = shuffled_fitness[start:end]
        best_index = np.argmin(group_fitness)
        elites.append(group[best_index])
    new_population = create_population(elites)
    return elites + new_population

```

```

def simulate():
    with open('population.txt', 'r') as file:
        data = file.read()
    population = [[generate_point_in_polygon_with_distance(sector, 0 ) for child in
range(swarm_size)] for _ in
        range(population_size)]
    circles = [plt.Circle((uav[0], uav[1]), 1, color='blue', fill=False) for uav in
population[0]]
    for circle in circles:
        ax.add_patch(circle)
    for i in range(num_generations + 1):
        print("gen: " + str(i) + " " + str(datetime.datetime.now()))
        population = evolve_population(population)
    return min(population, key=lambda c: calculate_fitness(c, radii))

```

ДОДАТОК Б
ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ
МАРШРУТІВ ПОКРИТТЯ СЕКТОРІВ

```
def cover_with_rotation(data):
    points_np = np.array(data)
    distances = distance_matrix(points_np, points_np)
    i, j = np.unravel_index(np.argmax(distances), distances.shape)
    p1, p2 = points_np[i], points_np[j]
    diameter = [p1, p2]
    angle = np.arctan2(p2[0] - p1[0], p2[1] - p1[1])
    centr = points_np.mean(axis=0)
    rotated_points = rotate(points_np, -angle, centr)
    min_rot_x, min_rot_y = np.min(rotated_points, axis=0)
    max_rot_x, max_rot_y = np.max(rotated_points, axis=0)
    strip_width = random.randint(100, 200) / 100
    num_strips = int((max_rot_y - min_rot_y) // strip_width)
    routes = []
    for i in range(num_strips):
        x_start = min_rot_x + i * strip_width
        x_end = x_start + strip_width
        if i % 2 == 0:
            strip_points = rotated_points[(rotated_points[:, 0] >= x_start) &
            (rotated_points[:, 0] <= x_end)]
        else:
            strip_points = rotated_points[(rotated_points[:, 0] >= x_start) &
            (rotated_points[:, 0] <= x_end)][::-1]
        routes.append(strip_points)
    return [rotate(route, angle, centr) for route in routes], diameter

def generate_points(A, B, n=50):
    x_values = np.linspace(A[0], B[0], n)
    y_values = np.linspace(A[1], B[1], n)
    points = [[x, y] for x, y in zip(x_values, y_values)]
    return points

def rotate(pnts, ang, centroid):
    rotation_matrix = np.array([
        [np.cos(ang), -np.sin(ang)],
        [np.sin(ang), np.cos(ang)]
    ])
    return np.dot(pnts - centroid, rotation_matrix) + centroid
```

```
for j, sector in graph.items():
    points = []
    for edge in sector:
        for i in range(len(edge)):
            for point in range(1, len(edge[0])):
                p = generate_points((edge[0][point - 1], edge[1][point - 1]),
                (edge[0][point], edge[1][point]))
                points.extend(p)

    routes, diameter = cover_with_rotation(points)
```

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdallah W., Val T. Genetic-Voronoi algorithm for coverage of IoT data collection networks. 30th International Conference on Computer Theory and Applications (ICCTA). 2020. С. 16–22. DOI: 10.48550/arXiv.2202.13735
2. Adaldo A., Mansouri S. S., Kanellakis C., Dimarogonas D. V., Johansson K. H., Nikolakopoulos G. Cooperative coverage for surveillance of 3D structures. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. С. 1838–1845
3. Ahmadi S. M., Kebriaei H., Moradi H. Constrained coverage path planning: evolutionary and classical approaches. *Robotica*. 2018. Vol. 36. С. 904–924
4. Aly A. A. PID Parameters Optimization Using Genetic Algorithm Technique for Electrohydraulic Servo Control System. *Intelligent Control and Automation*. 2011. 2. 69–76. DOI: 10.4236/ica.2011.22008
5. B. Li, Z. Fei, Y. Zhang. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6, № 2. С. 2241–2263
6. Bezas, K., Tsoumanis, G., Angelis, C.T., Oikonomou, K. Coverage Path Planning and Point-of-Interest Detection Using Autonomous Drone Swarms. *Sensors*. 2022. 22. 7551. DOI: 10.3390/s22197551
7. C. Zhao, J. Liu, M. Sheng, W. Teng, Y. Zheng, J. Li. Multi-UAV trajectory planning for energy-efficient content coverage: A decentralized learning-based approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2021. Vol. 39, № 10. С. 3193–3207
8. Canny, J.F., Lin, M.C. An Opportunistic Global Path Planner. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1990. 1554–1559
9. Cheng T. M., Savkin A. V. Decentralized control of mobile sensor networks for asymptotically optimal self-deployment in blanket coverage. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, № 1. С. 365–376
10. Choset, H., Pignon, P. Coverage Path Planning: The Boustrophedon Cellular Decomposition. Carnegie Mellon University. 1997

11. Colegrave, J., Branch, A. A case study of autonomous household vacuum cleaner. AIAA/NASA CIRFFSS. 1994
12. Darrah M., Wilhelm J., Munasinghe T., Duling K., Yokum S., Sorton E., Rojas J., Wathen M. A flexible genetic algorithm system for multi-UAV surveillance: algorithm and flight testing. *Unmanned Systems*. 2015. C. 49–62.
13. Elston J., Frew E. W., Lawrence D., Gray P., Argrow B. Net-Centric Communication and Control for a Heterogeneous Unmanned Aircraft System. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2009. Vol. 56, № 1–2. C. 199–232.
14. Fan, X., Li, H., Chen, Y., Dong, D. A Path-Planning Method for UAV Swarm under Multiple Environmental Threats. *Drones*. 2024. 8. 171. DOI: 10.3390/drones8050171
15. Gupta P., Prakash V., Suman P. Noticeable key points and issues of sensor deployment for large area wireless sensor network: A survey. 2016 International Conference System Modeling Advancement in Research Trends (SMART). 2016. C. 164–169
16. H. Ergezer, K. Leblebicioglu. Path planning for UAVs for maximum information collection. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2013. Vol. 49, № 1. C. 502–520
17. H. Wu, X. Tao, N. Zhang, X. Shen. Cooperative UAV cluster-assisted terrestrial cellular networks for ubiquitous coverage. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2018. Vol. 36, № 9. C. 2045–2058
18. Habib M. K. Coordinated multi robotic system for demining activities. *The First International Conference on Landmine: Detection, Clearance and Legislations (LDCL2017)*. 2017. C. 1–5
19. Hambling, D. *Swarm Troopers: How Small Drones Will Conquer the World*. Publishing Services Provided by Archangel Ink. 2015
20. Hert, S., Tiwari, S., Lumelsky, V. A terrain-covering algorithm for an AUV. *Autonomous Robots*. 1996. 3. 91–119
21. Hofner, P., Schmidt, G. Path planning for cleaning robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1995. 11(1). 125–132

22. J. Foo, J. Knutzon, V. Kalivarapu, J. Oliver, E. Winer. Path planning of unmanned aerial vehicles using B-splines and particle swarm optimization. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*. 2009. Vol. 6. C. 271–290
23. J. Holub, J. L. Foo, V. Kalivarapu, E. Winer. Three-dimensional multi-objective UAV path planning using digital pheromone particle swarm optimization. *53rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Hawaii, USA. 2012
24. J. R. Marden, J. Shamma. Revisiting log-linear learning: Asynchrony, completeness and payoff-based implementation. *Games and Economic Behavior*. 2012. Vol. 75, № 2. C. 788–808
25. Kinaneva, D., Hristov, G., Raychev, J., Zahariev, P. Early forest fire detection using drones and artificial intelligence. *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2019. 1060–1065
26. Klymash M., Kaidan M., Strykhalyuk B., Pyrih Y., Pyrih Y. Method for Estimating the Topological Structure of Self-Organized Networks. *17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*. 2023. C. 14–17. DOI: 10.1109/CADSM58174.2023.10076498
27. Kucherov D., Sushchenko O., Kozub A. Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control. *IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. 2019. Pp. 31–34. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943918
28. Kucherov D., Sushchenko O., Kozub A., Nakonechnyi V. Assessing the Operator's Readiness to Perform Tasks of Controlling by the Unmanned Aerial Platforms. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2020. 5(4). Pp. 457–462. DOI: 10.25046/aj050454
29. Kurabayashi, D., Namerikawa, T., Tani, H. Cooperative multi-robot exploration under the environment with obstacles using potential field method. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2016. 13. 155

30. Lambora A., Gupta K., Chopra K. Genetic Algorithm - A Literature Review. 2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon). 2019. Pp. 380–384. DOI: 10.1109/COMITCon.2019.8862255
31. Lamont G. B., Slear J. N., Melendez K. UAV swarm mission planning and routing using multi-objective evolutionary algorithms. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making (MCDM). 2007. C. 10–20.
32. Li, Y., Chen, H., Er, M.J., Wang, X. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method. Mechatronics. 2011. 21. 876–885
33. Lindhe M., Ogren P., Johansson K. H. Flocking with obstacle avoidance: A new distributed coordination algorithm based on Voronoi partitions. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005. Vol. 2. C. 1785–1790
34. M. Alzenad, A. El-Keyi, H. Yanikomeroğlu. 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station for maximum coverage of users with different QoS requirements. IEEE Wireless Communications Letters. 2018. Vol. 7, № 1. C. 38–41
35. Mahamuni C. V. A military surveillance system based on wireless sensor networks with extended coverage life. 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICCC). 2016. C. 375–381
36. Marden J. R., Arslan G., Shamma J. S. Cooperative control and potential games. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). 2009. Vol. 39, № 6. C. 1393–1407
37. McGuire, K., De Wagter, C., Tuyls, K., Kappen, H., de Croon, G.C. Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment. Sci. Robot. 2019. 4

38. Mirzal A., Yoshii S., Furukawa M. PID Parameters Optimization by Using Genetic Algorithm. arXiv. 2012. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1204/1204.0885.pdf>
39. Muralidharan A., Yan Y., Mostofi Y. Binary log-linear learning with stochastic communication links. IEEE Military Communications Conference (MILCOM). 2015. C. 1348–1353.
40. N. Gao, X. Li, S. Jin, M. Matthaiou. 3-D deployment of UAV swarm for massive MIMO communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2021. Vol. 39, № 10. C. 3022–3034
41. O. K. Sahingoz. Generation of Bézier curve-based flyable trajectories for multi-UAV systems with parallel genetic algorithm. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2014. Vol. 74. C. 499–511
42. Ollis, M., Stentz, A. Vision-based perception for an autonomous harvester. Field and Service Robotics. 1996. 25–32
43. P. Li, H. Duan. A potential game approach to multiple UAV cooperative search and surveillance. Aerospace Science and Technology. 2017. Vol. 68. C. 403–415
44. Pavlenko O., Tymoshenko A., Tymoshenko O., Luntovskyy A., Pyrih Y., Melnyk I. Searching Extreme Paths Based on Travelling Salesman’s Problem for Wireless Emerging Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023. Vol. 965. DOI: 10.1007/978-3-031-24963-1_16
45. Pyrih Y., Kaidan M., Tchaikovskiy I., Pleskanka M. Research of Genetic Algorithms for Increasing the Efficiency of Data Routing. 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT). 2019. C. 157–160. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847814
46. Q. Zhang, M. Jiang, Z. Feng, W. Li, W. Zhang, M. Pan. IoT enabled UAV: Network architecture and routing algorithm. IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6, № 2. C. 3727–3742
47. Rainville F., Fortin F., Gardner M., Parizeau M., Gagné C. DEAP: a python framework for evolutionary algorithms. 14th Annual Conference Companion

on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'12). 2012. DOI: 10.1145/2330784.2330799

48. S. M. Ahmadi, H. Kebriaei, H. Moradi. Constrained coverage path planning: evolutionary and classical approaches. *Robotica*. 2018. Vol. 36. C. 904–924

49. S. Yin, Y. Zhao, L. Li, F. R. Yu. UAV-assisted cooperative communications with time-sharing information and power transfer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69, № 2. C. 1554–1567

50. Sahingoz O. K. Generation of Bézier curve-based flyable trajectories for multi-UAV systems with parallel genetic algorithm. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2014. Vol. 74. C. 499–511

51. Sahingoz O. K. Networking models in flying Ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems: Theory & Applications*. 2014. Vol. 74, № 1–2. C. 513–527.

52. Sharaf A., Pillai M. Genetic Algorithm Based Clustering Techniques in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Study. 1st International Conference on Innovations in Information and Communication Technology (ICIICT). 2019. C. 1–5. DOI: 10.1109/ICIICT1.2019.8741485

53. Sivakumar A., Tan C. UAV swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone. *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. 2010. C. 1157–1164.

54. Skiadopoulos, K., Giannakis, K., Tsipis, A., Oikonomou, K., Stavrakakis, I. Impact of drone route geometry on information collection in wireless sensor networks. *Ad Hoc Netw.* 2020. 106. 102220

55. Sun J., Wu L., Yang X. Optimal Fractional Order PID Controller Design for AVR System Based on Improved Genetic Algorithm. 2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). 2020. Pp. 351–355. DOI: 10.1109/AEECA49918.2020.9213473

56. Swarnakar S., Kumar N., Kumar A., Banerjee C. Modified Genetic Based Algorithm for Load Balancing in Cloud Computing. *IEEE 1st International Conference*

for Convergence in Engineering (ICCE). 2020. C. 255–259. DOI: 10.1109/ICCE50343.2020.9290563

57. T. M. Cabreira, L. B. Brisolara, P. R. Ferreira. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*. 2019. Vol. 3. C. 4

58. V. V. Chetlur, H. S. Dhillon. Downlink coverage analysis for a finite 3-D wireless network of unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Communications*. 2017. Vol. 65, № 10. C. 4543–4558

59. VanderHeide, R., Rao, S. Terrain coverage for autonomous robots using a trapezoidal decomposition. *IEEE Conference on Robotics and Automation*. 1995

60. Vazquez-Carmona, E.V., Vasquez-Gomez, J.I., Herrera-Lozada, J.C., Antonio-Cruz, M. Coverage path planning for spraying drones. *Comput. Ind. Eng.* 2022. 168. 108125

61. Vazquez-Carmona, E.V., Vasquez-Gomez, J.I., Herrera-Lozada, J.C., Antonio-Cruz, M. Coverage path planning for spraying drones. *Comput. Ind. Eng.* 2022. 168. 108125

62. Walter B., Sannier A., Reiners D., Oliver J. H. UAV Swarm Control: Calculating Digital Pheromone Fields with the GPU. *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*. 2006. Vol. 3, № 3. C. 167–176.

63. Wang Y. H., Yu C. Y., Fu P. F. A coverage and connectivity method to cluster topology in wireless sensor networks. *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07)*. 2007. C. 97–102

64. Wang, J., Cheng, L., Yang, Y., Wang, Y. Multi-objective coverage path planning for UAVs based on an improved genetic algorithm. *Sensors*. 2021. 21. 4921

65. Whitley D. A genetic algorithm tutorial. *Stat Comput*. 1994. 4. 65–85. DOI: 10.1007/BF00175354

66. X. Fang, W. Feng, T. Wei, Y. Chen, N. Ge, C.-X. Wang. 5G embraces satellites for 6G ubiquitous IoT: Basic models for integrated satellite terrestrial networks. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, № 18. C. 14399–14417

67. X. Liu, et al. Transceiver design and multihop D2D for UAV IoT coverage in disasters. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6, № 2. C. 1803–1815
68. Xia, Y., Chen, C., Shi, J., Liu, Y., Li, G. Two-Layer Path Planning for Multi-Area Coverage by a Cooperated Ground Vehicle and Drone System. *ResearchGate*. 2020
69. Y. Eun, H. Bang. Cooperative task assignment/path planning of multiple unmanned aerial vehicles using genetic algorithms. *Journal of Aircraft*. 2009. Vol. 46, № 1. C. 338–343
70. Yamazaki, F., Liu, W. Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake. *6th Asia Conference on Earthquake Engineering*. 2016. 8
71. Yusoff T. A. F. K., Atan M. F., Rahman N. A., Wahab N. A., Salleh S. F. Optimization of PID Tuning Using Genetic Algorithm. *Journal of Applied Science & Process Engineering*. 2015. 2(2). 97–106. DOI: 10.33736/jaspe.168.2015
72. Zelinsky, A., Jarvis, R., Byrne, J., Yuta, S. Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot. *Proceedings of International Conference on Advanced Robotics*. 1993. 533–538
73. Zhang Y., Mou Z., Gao F., Xing L., Jiang J., Han Z. Hierarchical deep reinforcement learning for backscattering data collection with multiple UAVs. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8, № 5. C. 3786–3800.
74. Zhao J., Xi M. Self-Tuning of PID Parameters Based on Adaptive Genetic Algorithm. *2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 782. 042028. DOI: 10.1088/1757-899X/782/4/042028
75. Zhou Y., Li J., Lamont L., Rabbath C. A. Modeling of packet dropout for UAV wireless communications. *2012 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. 2012. C. 677–682.
76. Zitar R. A Review of the Genetic Algorithm and JAYA Algorithm Applications. *15th International Congress on Image and Signal Processing (CISP-BMEI)*. 2022. C. 1–7. DOI: 10.1109/CISP-BMEI56279.2022.9980332

77. Гороховський С.С. Сегментація зображень із використанням генетичних алгоритмів / Гороховський С. С., Мороз А. В. // Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки. - 2021. - Т. 4. - С. 52-55. - <https://doi.org/10.18523/2617-3808.2021.4.52-55>
78. Грицишин Я. М., Корпильов Д. В., Кривий Р. З., Свірідова Т. В., Ткаченко С. П. Генетичні алгоритми для розв'язання задач розміщення. Національний університет "Львівська політехніка". 2009. С. 271–276.
79. Кучеров Д., Долгих С., Мирошниченко І., Пошивайло О., Кравченко О. A flight situation advisory system for uninterrupted and efficient air transportation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. 1415. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012035
80. Кучеров Д., Долгих С., Пошивайло О. Protocol and Logical Models for Robustness and Survivability in Autonomous UAV Systems. 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2023. С. 1–7.
81. Кучеров Д., Козуб А., Ткаченко В., Росінська Г., Пошивайло О. PID Controller Machine Learning Algorithm Applied to the Mathematical Model of Quadrotor Lateral Motion. IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD). 2021. С. 86–89.
82. Кучеров Д., Пошивайло О., Мирошниченко І. Simulation of PID-Regulator Tuning Using Genetic Algorithm on Multi-Criteria Objective Function For Controlling Unstable Objects. National Aviation University. 2023
83. Кучеров Д., Пошивайло О., Мирошниченко І. Налаштування ПІД-регулятора генетичним алгоритмом за багатокритеріальною цільовою функцією для керування нестійким об'єктом. Проблеми управління і інформатизації. 2023. 4(76). С. 42-47
84. Кучеров Д., Ткаченко В., Халімон Н., Пошивайло О. Signals and Image Processing in Information Systems by Tensor Analysis Methods. IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2022. С. 277–280.

85. Кучеров Д., Шмельова Т., Долгіх С., Пошивайло О., Мирошниченко І., Шаптала С. Consensus Protocols for Improved Survivability in Autonomous Groups of UAVs. 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2023. С. 21–24.
86. Кучеров Д., Шмельова Т., Пошивайло О. Monitoring of a Critical Infrastructure Facility by UAVs. 2024
87. Леві Л. І., Носко Н. В. Застосування генетичних алгоритмів для оптимізації розміщення технологічних об'єктів. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. 2024. № 158–719. С. 1–8.
88. Пиріг Я., Климаш М., Пиріг Ю., Лаврів О. Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. 2023. Вип. 3(2). С. 95–107. DOI: 10.23939/ictee2023.02.095
89. Писаренко А. В. Система прийняття рішень з використанням навчання з підкріпленням для керування гетерогенними роями БПЛА. Вісник ХНТУ. 2023. № 4(87). С. 218

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Національного центру управління
та випробувань космічних засобів, канд. техн.
наук, старш. наук. співр.



Володимир ПРИСЯЖНИЙ

2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» Пошивайло Олексія Максимовича «Інформаційна технологія побудови маршрутів гетерогенних груп БпЛА для покриття території»

Комісія Національного центру управління та випробувань космічних засобів у складі: голови комісії – начальника відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук, старш. наук. співр. Козуба А.М. головного фахівця відділу науково-дослідної та випробувальної роботи, канд. техн. наук Кутового О.М., головного фахівця відділу науково-дослідної та випробувальної роботи Мироненка В.М. у період з 6 по 7 січня 2025 року розглянула основні результати дисертаційного дослідження, отримані особисто Пошивайло О.М., а саме:

метод побудови маршруту для гетерогенних груп БпЛА для виконання завдань покриття території;

симуляційна модель для перевірки ефективності алгоритму колективного управління у віртуальному середовищі;

пропозиції для практичної реалізації алгоритму колективного управління у задачах покриття території.

Основні результати дисертаційних досліджень автора опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані на наукових конференціях.

На підставі розгляду представлених матеріалів комісія встановила та цим актом засвідчує, що результати вищезазначеного дисертаційного дослідження, отримані Пошивайлом Олексієм Максимовичем використані у Національному центрі при проведенні прикладних наукових досліджень щодо обґрунтування напрямків розвитку систем моніторингу, у тому числі шляхом використання груп БпЛА для виконання завдань покриття території.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є підставою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії:

А.М. Козуб

Члени комісії:

О.М. Кутовий

В.М. Мироненко



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з навчальної роботи

Анатолій ПОЛУХІН

2024 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес
Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Ми, що нижче підписалися, декан факультету комп'ютерних наук та технологій, к.т.н., доцент Фесенко А.О., завідувач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, д.т.н., професор Нечипорук О.П. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Пошивайла Олексія Максимовича "Інформаційна технологія побудови маршрутів гетерогенних груп БПЛА для покриття території" використовуються у навчальному процесі Державного університету «Київський авіаційний інститут», факультету комп'ютерних наук та технологій на кафедрі інтелектуальних кібернетичних систем.

Вид результату, що впроваджується	Форма впровадження	Ефект від впровадження
1. Метод управління рухом мультиагентної системи, агентами якої є БПЛА.	У навчальних програмах дисциплін: – "Мультиагентні системи управління" для спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія ОПП "Системне програмування" № РБ-4-123-2/21- 3.15, що затверджена 22.11.2022 р.;	Підвищення якості навчання.
2. Симуляційна модель моніторингу земної поверхні	– "Інтелектуальні системи управління в авіації", для спеціальності 126 Інформаційні системи та технології ОПП "Інтелектуальні системи та технології" № НМ-4-126/23-2.1.6, що затверджена 17.09.2024 р.	
3. Застосування генетичного алгоритму при проектуванні складних завдань моделювання колективних дій БПЛА	У кваліфікаційних роботах.	Інтенсифікація навчального процесу.

Декан факультету комп'ютерних наук та технологій

Андрій ФЕСЕНКО

Завідувач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем

Олена НЕЧИПОРУК

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 132496

Комп'ютерна програма «Програма пошуку вершин зваженої діаграми Вороного генетичним алгоритмом для покриття території групою безпілотних літальних апаратів»

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) Пошивайло Олексій Максимович

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю Пошивайло Олексій Максимович, пров. Токарний, 9, кв. 88, м. Полтава, 36008

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 30 грудня 2024 р.

Директор Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»

Олена ОРЛЮК

