

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Модель мобільної сенсорної мережі для VANET

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-20-2
Крят Д.С.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Токарев В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Волк М.О.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

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

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

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Кряту Дмитру Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модель мобільної сенсорної мережі для VANET

затверджена наказом по університету від “ 24 ” березня 2022 р. № 413 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18 травня 2022р.

3. Вхідні дані до роботи 1) провести дослідження методів вибору оптимального маршруту для збору даних за допомогою БПЛА; 2) CPU type: Mobile DualCore Intel Core i5-430M, 2533 MHz (19 x 133); 3) операційна система – Windows 10; 4) тип ядра ОС: Multiprocessor Free (64-bit); 5) представлення вихідних даних: згідно нормативних документів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) огляд літератури за темою роботи;

2) аналіз предметної області;

3) вибір та обґрунтування методики дослідження;

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайд-презентація – 20 слайдів _____

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

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	29.03.22 - 05.04.22	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	06.04.22 - 16.04.22	
3	Вибір інструментальних засобів	17.04.22 - 29.04.22	
4	Проведення експериментів	30.04.22 - 04.05.22	
5	Оформлення матеріалів атестаційної роботи	05.05.22 - 10.05.22	
6	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та попередній захист	11.05.22 - 12.05.22	
7	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	13.05.22 - 17.05.22	

Дата видачі завдання 28 березня 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Токарев В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 64 с., 19 рис., 1 табл., 1 дод., 14 джерел.

БЕЗДРОТОВА СЕНСОРНА МЕРЕЖА, БПЛА, ПРОТОКОЛ, ІоТ, WI-FI.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження методів вибору оптимального маршруту для збору даних за допомогою БПЛА.

У ході виконання кваліфікаційної роботи розглядаються інноваційні питання, застосування БПЛА в автомобільних цільових мережах VANET. Використання БПЛА в якості вузла автомобільної мережі багато в чому розширює її можливості і відкриває великі перспективи для дослідників з метою поліпшення пропускної здатності мережі, інформативності, безпеки, тим самим значно покращуючи і розширюючи сфери її застосування. Очікується, що впровадження нових послуг на базі ІТС, таких як D2D-комунікації, впровадження БПЛА як елемента мережевої інфраструктури, значно поліпшить безпеку дорожнього руху і управління дорожнім рухом.

ABSTRACT

Master's thesis: 64 pages, 19 figures, 1 tables, 1 appendices, 14 sources.

DRONE, IoT, PROTOCOL, WI-FI, WIRELESS SENSOR NETWORK.

The purpose of the qualification work is to study the methods of choosing the optimal route for data collection using Drone.

In the course of qualification work innovative issues, application of UAVs in automobile target networks VANET are considered. The use of UAVs as a node of the automotive network greatly expands its capabilities and opens up great opportunities for researchers to improve network throughput, information, security, thereby significantly improving and expanding the scope of its application. It is expected that the introduction of new ITS-based services, such as D2D communication, the introduction of UAVs as part of the network infrastructure, will significantly improve road safety and traffic management.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	8
1 ВИКОРИСТАННЯ БПЛА, ЯК ВУЗЛА ЦІЛЬОВИХ АВТОМОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ (VANET)	10
1.1 Сценарії використання БПЛА.....	12
1.2 Значення для ІТС при впровадженні послуг на базі БПЛА.....	15
2 МЕТОДИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ДЛЯ ЗБОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА	17
2.1 Огляд існуючих методів вибору траєкторії руху БПЛА.....	18
2.2 Позиціонування БПЛА над наземним сегментом ЛСМ	19
2.2.1 Можливі підходи до оцінки самоподібності параметрів функціонування системи.....	19
2.2.2 Взаємодія БПЛА і наземного сегмента ЛСМ при відомій топології мережі.....	25
2.3 Поиcк оптимального маршрута дoвиження БПЛА	31
2.3.1 Подання задачі комівoяжера у вигляді графа	32
2.3.2 Огляд існуючих методів вирішення задачі комівoяжера.....	34
2.3.3 Огляд існуючих методів вирішення задачі комівoяжера.....	34
3 ПРОВЕДЕННЯ ТЕСТУВАННЯ ОБРАНИХ МЕТОДІВ	43
ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	51
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

БСМ – бездротова сенсорна мережа

ІТС – інтелектуальна транспортна система

ЛСМ – літаюча сенсорна мережа

МСО – мережа, яка самоорганізується

СМО – система масового обслуговування

ІоТ – інтернет речей (англ., Internet of Things)

ВСТУП

Мережі, які самоорганізуються (МСО), одна з технологій побудови мобільних мереж. Основними відмінностями між МСО і мережами з жорстко визначеною топологією є:

- не існує центрального органу, відповідального за адресацію;
- вузли мережі можуть приєднуватися / залишати мережу або переміщатися довільним чином.

Крім того, структура самоорганізованих мереж залежить від маршрутів між вузлами мережі. Маршрути залежать від параметрів мережі, таких як: кількості вузлів, радіусу зв'язку і щільності вузлів, і також від вибору протоколу маршрутизації для даної мережі. Для з'ясування впливу параметрів мережі на параметри маршрутів, ми наводимо аналіз структури самоорганізованих мереж в загальному випадку, коли вузли розподіляються випадковим чином по деякій заданій території, а зона зв'язку вузла описується колом із заданим радіусом. Параметрами маршрутів є: довжина маршруту, число стрибків (транзитів), частка транзитних вузлів, навантаження на транзитні вузли, і т.д. У магістерській кваліфікаційній роботі, наводяться результати аналізу частки транзитних вузлів і оцінка її згідно з параметрами мережі. Крім того, також розглянуті залежності зв'язності мережі в різних умовах, коли всі вузли або тільки їх частина можуть виконувати функції транзиту. Завдання дослідження довжини маршруту, числа стрибків у маршруті і залежності якості обслуговування від параметрів маршруту – є предметом подальшого дослідження.

Як правило, МСО, як і інші мережі, забезпечує функції доступу і функції транзиту. Часто виділяють такі способи побудови структури мережі, як Ad Hoc і Mesh (коміркова). Фактично Ad Hoc мережа є самостійно конфігурованою мережею. Її вузли забезпечують зв'язок з сусідніми вузлами і виконують функції транзиту трафіку. Вузли mesh також можуть виконувати

функції маршрутизації, при цьому не накладається обмеження на структуру маршрутів. Багато мереж використовують принципи самоорганізації, такі як: бездротові сенсорні мережі (WSN-Wireless Sensor Networks), всепроникні сенсорні мережі (USN-Ubiquitous Sensor Networks), мережі для транспортних засобів (VANET-Vehicular Ad Hoc Networks), літаючі сенсорні мережі (FANETFly Ad Hoc Networks) і т.д. Бездротові МСО мають динамічну структуру, в якій кількість вузлів і їх взаємні відносини можуть змінюватися в досить широких межах. Це ускладнює процес визначення топології і організацію маршрутизації. При цьому, висувається вимога автоматичного пошуку найкращого маршруту (групи маршрутів) для забезпечення одного або декількох якісних параметрів процесу прийому/передачі. Тому пошук маршрутів (групи маршрутів) між вузлами мережі є однією з основних задач в мобільних МСО. Крім того, параметри маршрутів, такі як: зв'язність (кількість маршрутів), довжина маршруту, число стрибків у маршруті, і частка транзитних вузлів (частка вузлів мережі, що беруть участь в маршрутизації) - істотно впливають на якість обслуговування трафіку мобільного МСО. У магістерській кваліфікаційній роботі наведені результати дослідження застосування моделі мобільної сенсорної мережі для VANET. Досліджено впливи складу мережі (параметрів мережі) на маршрути (частку транзитних вузлів), а також наведено оцінку необхідної частки вузлів з функціями транзиту, яка забезпечує досить високу ймовірність зв'язності зв'язку.

1 ВИКОРИСТАННЯ БПЛА, ЯК ВУЗЛА ЦІЛЬОВИХ АВТОМОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ (VANET)

Автомобільні цільові мережі VANET забезпечують взаємодію між транспортними засобами та стаціонарної інфраструктурою, але існує кілька проблем при їх використанні – це розриви між вузлами, відсутність головного вузла або неможливість виступати в ролі головного вузла протягом тривалого часу будь-якому вузлу і т.д.

Одним з варіантів вирішення даних проблем є можливість використання БПЛА загального користування, які можуть вбудовуватися в інфраструктуру мережі VANET і забезпечувати підтримку роботи всіх необхідних служб, організовуючи стійкий зв'язок між вузлами мережі (рисунок 1.1). Використання БПЛА в мережі VANET:

- проміжний вузол мережі зв'язку з використанням стандарту IEEE 802.11p для збільшення радіусу дії мережі;
- можливість раннього попередження про можливі перешкоди та аваріях;
- вузол організації руху на перехресті;
- пошук і спостереження за транспортними засобами;
- моніторинг і аналіз дорожнього руху;
- тимчасовий головний вузол мережі VANET.

У даній моделі БПЛА є таким же вузлом мережі, як і інші учасники дорожнього руху. БПЛА забезпечує канали зв'язку з автомобілями і з придорожною станцією. Застосування БПЛА в мережах VANET дозволяє значно збільшити радіус взаємодії вузлів мережі, а також організувати з'єднання пристроїв з придорожніми станціями, де прямий зв'язок виду «автомобіль - придорожня станція» неможливий. Збільшення дальності взаємодії обумовлено тим, що приймально передавальне обладнання БПЛА знаходиться значно вище над землею, ніж обладнання, інтегроване в

автомобіль, а значить, сигнал менше загасає і не поглинається навколишнім середовищем.

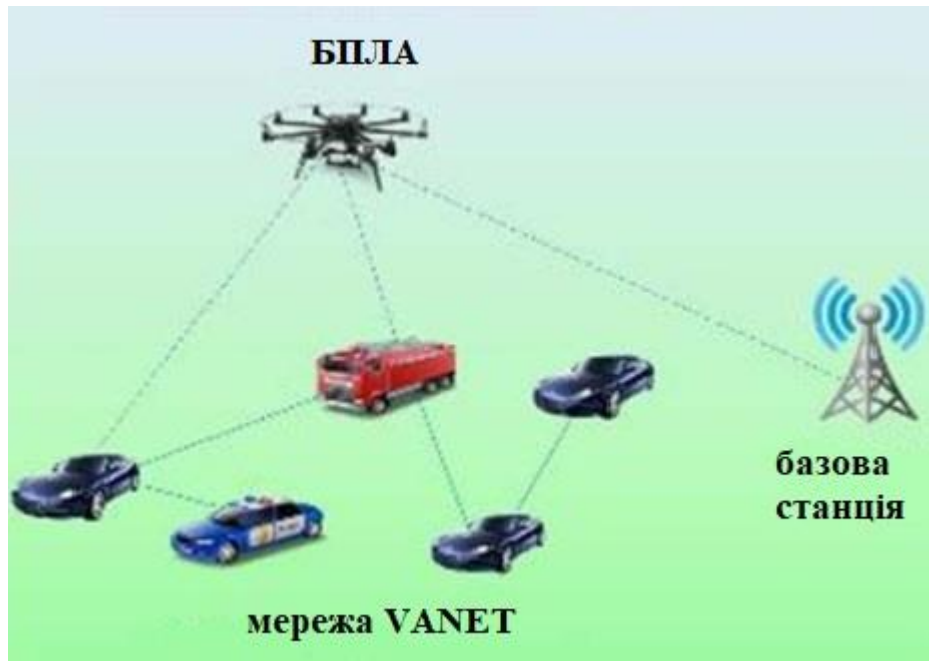


Рисунок 1.1 – Модель мережі VANET з використанням БПЛА

Також варто виділити ряд переваг застосування БПЛА для мереж VANET:

- зменшення динамічності топології;
- підвищення інформативності водія;
- організація пошуку транспортного засобу, за відсутності інших способів зв'язку.

Використання БПЛА в якості вузла автомобільної мережі багато в чому розширює її можливості і відкриває великі можливості для дослідників з метою поліпшення пропускну здатності мережі, інформативності, безпеки, тим самим значно покращуючи і розширюючи сфери її застосування. Для таких мереж необхідно розробити ряд тестів:

- для перевірки функціональності вузлів;
- визначення ймовірності доставки пакетів, затримок при виборі

БПЛА в ролі головного вузла мережі;

- визначення максимальної кількості автомобілів, які може обслужити безпілотний літальний апарат.

Для вирішення останньої проблеми можна використовувати класичні методи тестування, які застосовуються для систем масового обслуговування, що дозволяють визначити максимально можливе число транспортних засобів для обслуговування БПЛА. На рисунку 1.2 представлена мережа VANET в ролі системи масового обслуговування (СМО).



Рисунок 1.2 – Мережа VANET в якості СМО

1.1 Сценарії використання БПЛА

Вищезазначені різні сценарії обміну даними можуть використовуватися для організації інфраструктури інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Одна з використовуваних телекомунікаційних технологій – радіозв'язок ближнього радіусу дії (DSRC), яка базується на стандарті IEEE 802.11p і має обмеження по площі радіопокриття (600 - 1000 м). У разі відсутності можливості підключення (поза зоною впевненого прийому), стає проблематично забезпечити зв'язок між автомобілями (комунікації V2V - Vehicle-to-Vehicle), а також забезпечити взаємодію з дорожньою

інфраструктурою (комунікації V2I - Vehicle-to-Infrastructure) (наприклад, для збору даних про затори і щільності потоку автомобілів, а також для повідомлення водіїв про надзвичайні ситуації на дорозі і т.д.). Використання БПЛА для ІТС дозволяє забезпечити зв'язність навіть при виході автомобіля з зони впевненого прийому. Тимчасовий літаючий вузол на базі малого БПЛА взаємодіє з транспортними засобами на основі сучасної технології Dedicated Short-Range Communications (виділені засоби зв'язку ближнього радіусу дії DSRC) і іншими технологіями, що дозволяють транспортним засобам отримувати доступ до служб ІТС. БПЛА можуть об'єднуватися в групи, створюючи таким чином мережу літаючих вузлів Fly Ad Hoc Networks (FANET), замінюючи один одного, якщо це необхідно, і забезпечуючи постійну підтримку інфраструктури (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Застосування БПЛА для ІТС

В рамках розглянутого завдання БПЛА може використовуватися в ІТС для наступних цілей:

- вузол для з'єднання транспортних засобів (комунікації V2V);
- шлюз для підмережі транспортних засобів з метою доступу до наземної інфраструктури ІТС (комунікації V2I).

Можливі й інші види використання.

На рисунку 1.4 показано використання БПЛА в якості шлюзу для доступу до наземної інфраструктури ІТС. В цьому випадку БПЛА діє як «літаючий гетерогенний маршрутизатор», який забезпечує доступ до сервісів і додатків ІТС в тих випадках, коли транспортний засіб не може безпосередньо зв'язуватися з наземною інфраструктурою ІТС.

На рисунку 1.5 показано використання БПЛА або в якості сполучного вузла для транспортних засобів або групи транспортних засобів. В даному випадку використання БПЛА покращує зв'язність і збільшує відстань для взаємодії транспортних засобів в рамках інфраструктури ІТС.

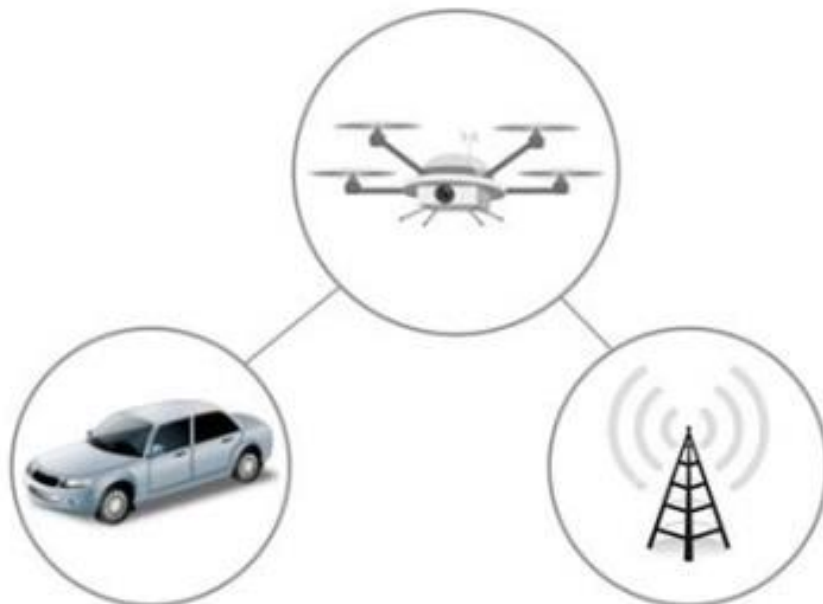


Рисунок 1.4 – Приклад використання БПЛА



Рисунок 1.5 – Приклад використання БПЛА

БПЛА являють собою мережевий вузол інфраструктури VANET, так само як і інші вузли. БПЛА створюють канали зв'язку як з OBU (On-Board Unit пристрою на борту транспортних засобів), так і з сервісами та додатками ІТС. Під час польоту БПЛА можуть тривалий час забезпечувати зв'язок для більшості транспортних засобів в зв'язку з тим, що вони знаходяться високо і взаємодіють з транспортними засобами в межах прямої видимості. Використання БПЛА також дозволяє значно збільшити відстань взаємодії між мережевими вузлами. Відстань збільшується, тому що БПЛА набагато вище землі і будівель, ніж обладнання OBU, тому сигнали зникають і поглинаються оточуючими об'єктами і ландшафтом в меншій мірі.

1.2. Значення для ІТС при впровадженні послуг на базі БПЛА

Очікується, що впровадження нових послуг на базі ІТС, таких як D2D-комунікації, впровадження БПЛА як елемента мережевої інфраструктури, значно поліпшить безпеку дорожнього руху і управління дорожнім рухом.

Зв'язок між обладнанням VANET, яке відповідає за запобігання зіткнень, надання інформації про статус дорожнього руху, надання послуг раннього попередження про перешкоди і т.д., і інфраструктура ІТС забезпечують комплексний підхід в наданні принципово нових сервісів і послуг для водіїв і служб регулювання дорожнього руху. Існує цілий ряд проблем, які можуть бути вирішені з використанням БПЛА в якості елемента ІТС. Наприклад, БПЛА може фіксувати дорожню ситуацію (використовуючи відеоаналітику і іншу інформацію) і інформувати водіїв про небезпеку на дорозі задовго до того, як вони опиняться біля того місця, де знаходиться небезпека.

2 МЕТОДИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ДЛЯ ЗБОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

Будемо вважати, що бездротова сенсорна мережа (БСМ) розміщена на деякій плоскій поверхні. При наявності повної інформації про топологію мережі взаємодія БПЛА з вузлами БСМ, в першу чергу, передбачає зняття отриманої (накопиченої) інформації. В системі «БСМ - БПЛА - шлюз» роль БПЛА може бути різною, залежно від способу організації доставки даних.

Наприклад, можливі наступні варіанти:

- транзит трафіку через мережу БПЛА. В цьому випадку БПЛА обладнаний вузлом БСМ, який виступає в ролі транзитного (можливо, головного) вузла. Також БПЛА обладнаний засобами зв'язку «БПЛА - БПЛА», які утворюють мережу між рухомими об'єктами, що забезпечує маршрут трафіка до шлюзу;

- транзит трафіка через вузол БПЛА. В цьому випадку БПЛА обладнаний вузлом БСМ, який виступає в ролі транзитного та/або головного вузла, і засобами зв'язку зі шлюзом, що знаходяться в зоні зв'язку шлюза;

- доставка даних. В цьому випадку БПЛА обладнаний вузлом БСМ, який виступає в ролі головного вузла або шлюзу. Отримувані вузлом дані зберігаються в його запам'ятовуючому пристрої протягом часу, необхідного для переміщення БПЛА до точки базування, де проводиться зчитування зібраних даних. У цьому випадку має місце затримка доставки даних, що дорівнює часу руху БПЛА.

Розглянемо останній з варіантів використання БПЛА як найбільш ймовірний. У цьому випадку систему можна розглядати як мережу, толерантну до затримок. У цій мережі мають місце два основних способи передачі (транспортування) даних:

- перший – за допомогою технологій бездротового зв'язку (БСМ - БПЛА);

- другий (механічний) – переміщення БПЛА в просторі.

Ймовірно, що в даному випадку другий спосіб вимагає істотно більшого часу. Однак, одним з основних показників якості функціонування мереж, толерантних до затримок, є час доставки даних. У зв'язку з вищесказаним будемо розглядати метод вибору траєкторії руху БПЛА в літаючій сенсорній мережі (ЛСМ), спрямований на мінімізацію часу доставки даних.

2.1 Огляд існуючих методів вибору траєкторії руху БПЛА

Існує безліч можливих методів вибору траєкторії руху БПЛА в певній місцевості. Всі вони відрізняються критеріями вибору, які залежать від поставленого завдання і цілі польоту БПЛА. В оглядовій літературі розглядається рішення задачі вибору оптимальної траєкторії руху БПЛА в залежності від перешкод, що зустрічаються на його шляху, зіткнення або взаємодії з якими потрібно уникнути. Безліч досліджень на тему оптимізації траєкторії руху БПЛА пов'язано із застосуванням БПЛА для військових цілей. Таке положення пов'язане з широким застосуванням БПЛА для військових завдань. Для військових цілей в якості критеріїв для вибору траєкторії БПЛА можуть використовуватися такі завдання, як, наприклад, запобігання виявлення БПЛА ворожими локаторами і т.д. В іншій оглядовій літературі розглядається задача відстеження і позиціонування БПЛА при наявності діючої наземної бездротової мережі. Автором запропонований метод вибору траєкторії БПЛА, при якому БПЛА використовує наземну бездротову мережу для передачі інформації про координати свого місця розташування. Розрахунок і побудова маршруту при цьому відбувається завчасно. Такий метод накладає певні обмеження на вибір траєкторії – шлях БПЛА повинен проходити в зоні дії радіосигналу наземної бездротової мережі, тобто залежати від мережевого покриття. Крім того, можливість БПЛА передавати і приймати інформацію про місцезнаходження залежить

від пропускної здатності наземної мережі. У кваліфікаційній магістерській роботі досліджується питання вибору траєкторії руху БПЛА цивільного призначення.

2.2 Позиціонування БПЛА над наземним сегментом ЛСМ

При використанні БПЛА для взаємодії з вузлами наземної сенсорної мережі необхідно вирішити ряд завдань, пов'язаних з позиціонуванням БПЛА над територією, що обслуговується БСМ. При цьому можливий ряд варіантів взаємодії, в залежності від наявності, повноти та достовірності даних про топологію мережі:

- топологія мережі повністю невідома;
- топологія мережі повністю відома;

При цьому під топологією в даному випадку розуміються параметри, що характеризують розташування вузлів мережі. Розглянемо ці варіанти.

2.2.1 Взаємодія БПЛА і наземного сегмента ЛСМ при невідомій топології мережі

Будемо вважати, що при русі над територією, яка обслуговується БСМ, що складається з N вузлів, БПЛА має можливість визначати свої координати в просторі, тобто координату точки $O = (x_0, y_0, z_0)$, а також визначати відстань між цією точкою і будь-яким чинним вузлом БСМ, що знаходяться в зоні зв'язку. Вузли мережі мають функцію визначення відстані між собою. Якщо мережа пов'язана, то матриця містить повну інформацію про структуру мережі, за винятком топологічних характеристик, таких як географічні координати її вузлів. Однак, в даному завданні інформація про мережу не локалізована в вигляді зазначеної матриці. Кожен з вузлів мережі має у своєму розпорядженні лише дані про відстані до сусідніх вузлів (інцидентних вершин). Таким чином, БПЛА має можливість отримати інформацію від

просторової лінійної засічки, який дозволяє визначити невідомі координати точки (вузла мережі) по відстані до точок (вузлів мережі або БПЛА) з відомими координатами. При використанні такого методу складається система рівнянь виду:

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 = r_{ij}^2, \quad i = 1 \dots K, \quad (2.1)$$

де (x_i, y_i, z_i) – відомі координати K точок;

(x_j, y_j, z_j) – шукані координати j -ї точки;

r_{ij} – відстань між i -ю і шуканою точкою.

Дана система розв'язана, щодо невідомих координат, в разі, коли число рівнянь не менш, ніж число шуканих координат. У разі тривимірного простору система (2.1) має містити мінімум три рівняння, тобто при русі БПЛА над територією, що обслуговується БСМ, можливі два варіанти:

- в зоні його дії немає жодного вузла;
- в зоні його дії є один або більше вузлів мережі.

У першому випадку очевидно, що БПЛА (його обчислювальний засіб) не може зробити ніяких дій в частині оцінки координат елементів БСМ. У другому випадку такі дії можуть бути виконані, однак ці дії будуть залежати від числа доступних вузлів БСМ.

Розглянемо можливі варіанти. Будемо вважати, що координати всіх елементів мережі і БПЛА розглядаються в тривимірному просторі.

У зоні дії БПЛА знаходиться один вузол n_j БСМ (рисунок 2.2).

Для визначення координат вузла потрібно мінімум три рівняння системи (2.1). В цьому випадку необхідно отримати координати трьох точок O_1, O_2, O_3 на траєкторії проходження БПЛА і відстань між цими точками і точкою розташування вузла n_j $r_{oj}^1, r_{oj}^2, r_{oj}^3$. У зоні дії БПЛА знаходиться

декілька вузлів БСМ. На рисунку 2.3 приведена схема взаємного положення БПЛА і вузлів БСМ. У зоні дії БПЛА в даному прикладі знаходиться три вузла, причому ці вузли перебувають в зонах дії один одного і можуть оцінити відстані між собою r_{12} , r_{13} и r_{23} .

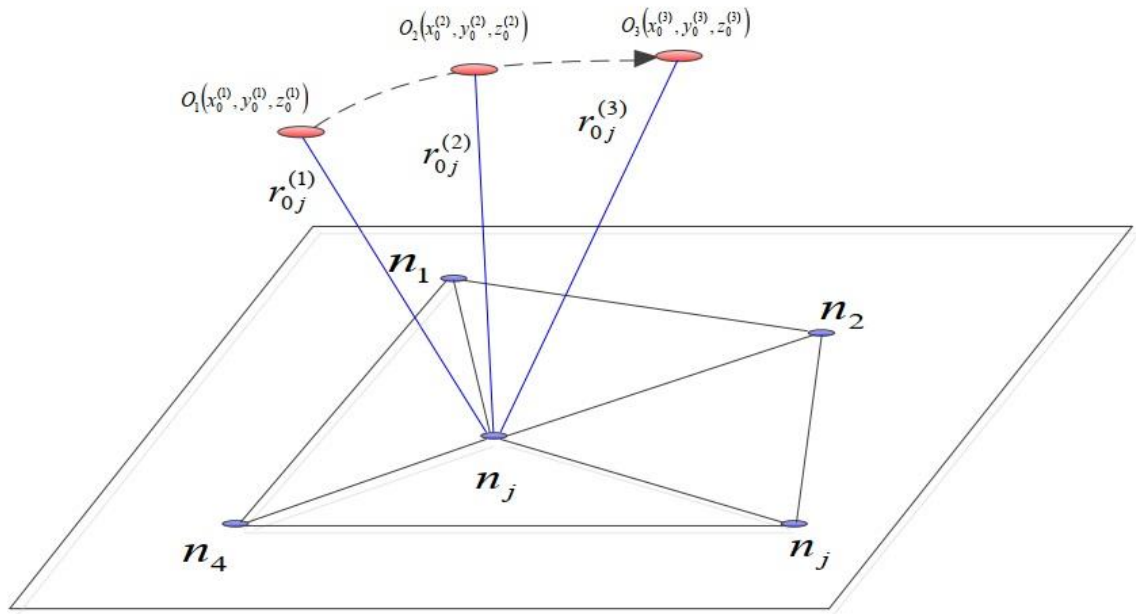


Рисунок 2.2 – Один вузол БСМ в зоні дії БПЛА

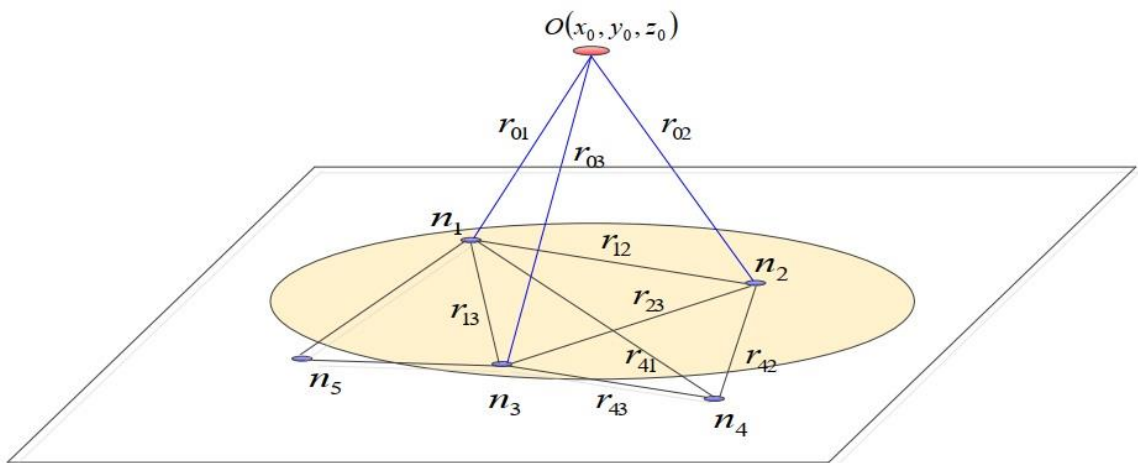


Рисунок 2.3 – Кілька вузлів БСМ в зоні дії БПЛА

Дані про відстані між вузлами можуть бути передані БПЛА. Узагальнюючи розглянуті приклади, можна зробити висновок про те, що потенційно можливе число обчислюваних координат вузлів мережі дорівнює числу доступних пов'язаних вузлів і їхніх спільних сусідів, причому зв'язаність останніх повинна бути не менше трьох (для тривимірної задачі). Узагальнюючи розглянуті приклади, можна зробити висновок про те, що для вирішення завдання позиціонування вузлів мережі необхідно визначити логіку (алгоритм) управління рухом і функціями БПЛА. Алгоритм можна визначити наступним чином. Обчислювальний пристрій БПЛА містить наступні змінні (елементи):

- координати БПЛА $O(x_0, y_0, z_0)$;
- квадратна матриця відстаней $r = \|r_{ij}\|$, $i, j = 0 \dots N$;
- матриця координат вузлів $n = \|n_i\|$, $i = 0 \dots N$;
- матриця ознак отримання інформації $g = \|g_i\|$, $i = 0 \dots N$, в якій відбивається факт прийому даних (корисної інформації) від вузлів мережі (необхідна в тому випадку, коли паралельно вирішується завдання опитування вузлів мережі).

При виявленні в зоні дії БПЛА q - нових вузлів, проводиться вимірювання відстані до кожного з них; отримані дані заносяться в матрицю r ; також в цю матрицю заноситься інформація про відстані до сусідніх з ними вузлів. Для обчислення координат вибираються ті рядки матриці r_i (вузли), для яких відповідні елементи матриці $n_i = 0$ (не визначені координати) і які містять не менше трьох елементів $r_{ij} \neq \infty$, крім елемента $i = j$, причому мінімум, ніж для трьох цих елементів, відомі координати вузлів, тобто $n_j \neq 0$.

На основі вибраних даних будується система рівнянь виду (2.1), рішенням якої є координати вузлів, що відповідають обраним рядкам матриці r . Обчислені координати заносяться в матрицю n . Для вузлів, з якими було

проведено сеанс зв'язку (прийом корисної інформації), робиться відповідна відмітка в матриці g ($g_i = 1$). Для вирішення подібних систем рівнянь зазвичай використовується метод найменших квадратів, який для системи рівнянь (2.1) може бути записаний як:

$$(x_j, y_j, z_j) = \arg \min_{x_j, y_j, z_j} \sum_{i=1}^K [\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} - r_{ij}]^2, \quad (2.2)$$

Задача знаходження мінімуму суми в виразі (2.2) по змінним x , y , z вирішується з використанням чисельних методів оптимізації.

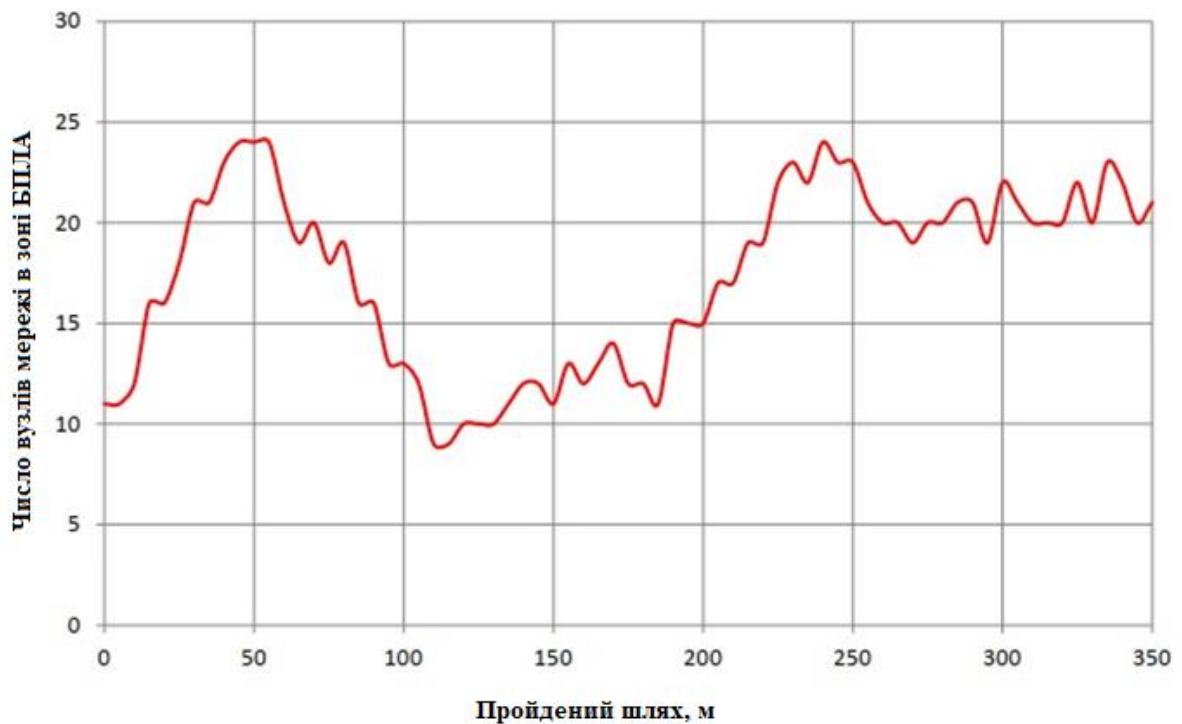


Рисунок 2.4 – Змінення числа вузлів мережі в зоні БПЛА, отримане методом імітаційного моделювання

Матриця n , в певний момент часу t , фактично містить інформацію про топологію мережі, яка була отримана до цього моменту часу. Ця інформація може бути використана для вибору траєкторії руху БПЛА. На основі даних з

матриці n можуть бути визначені межі дослідженої на даний момент часу області на території, що обслуговується і координати найближчих вузлів мережі, з яких отримали повну інформацію про розташування вузлів мережі. Ця інформація може бути використана для подальшої взаємодії з БСМ, а також для локалізації подій, що реєструються вузлами мережі.

2.2.2 Взаємодія БПЛА і наземного сегмента ЛСМ при відомій топології мережі

Доставка (транспортування) даних передбачає збір і доставку даних в точку простору, де можлива їх передача в шлюз. При наявності повної інформації про топологію мережі, взаємодія БПЛА з вузлами БСМ в першу чергу передбачає зняття отриманої (накопиченої) інформації (інформація про топологію мережі може бути отримана, наприклад, при побудові мережі, якщо фіксуються координати кожного з вузлів при його розміщенні, або за допомогою методу, описаного вище). Збір даних проводиться з використанням технології зв'язку між вузлами БСМ, що має обмежений радіус зв'язку.

Тому, в залежності від масштабів мережі і вимог до часу доставки даних, збір даних являє собою переміщення БПЛА між вузлами або групами вузлів БСМ і зчитування даних. Траєкторія руху БПЛА в цьому випадку залежить від характеру розміщення вузлів мережі на території, що обслуговується. Якщо радіус зв'язку БПЛА може забезпечити взаємодію з деяким числом вузлів БСМ, то доцільно знайти точки, в яких може бути обслуговано максимальне число вузлів. Тоді траєкторія руху БПЛА буде лінією, що з'єднує дані точки. Від вибору траєкторії істотно залежить довжина маршруту БПЛА, а отже, і час доставки даних.

На рисунку 2.5 і рисунку 2.6 наведені приклади покриття вузлів БСМ колами з радіусом, рівним радіусу зв'язку БПЛА, при різному характері

розміщення вузлів по території. Для знаходження траєкторії, при русі по якій БПЛА має можливість зчитати інформацію з усіх вузлів мережі, потрібно знайти покриття всіх вузлів БСМ. При цьому слід виходити з мінімуму витрат часу. Вважаючи, що швидкість руху БПЛА постійна, потрібно знайти траєкторію найменшої довжини.

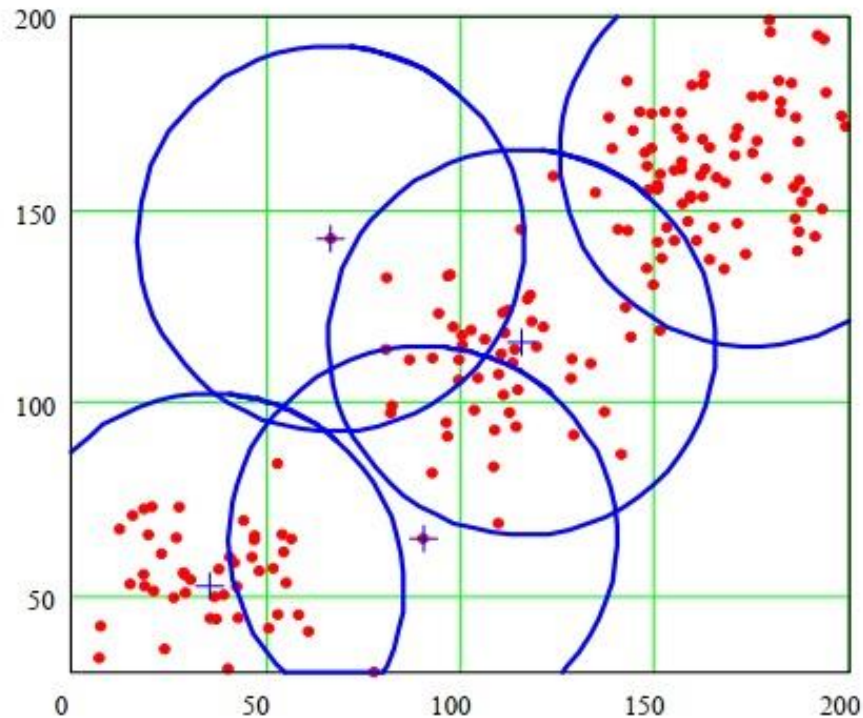


Рисунок 2.5 – Різний характер розміщення вузлів на території обслуговування

Будемо вважати, що зона дії БПЛА являє собою коло радіуса R , а зчитування інформації з вузлів БСМ може проводитися в довільних точках (рисунок 2.7). Розділимо це завдання на дві складові:

- знаходження мінімального числа точок, в яких проводиться зчитування інформації (мінімізація);
- визначення оптимального маршруту руху БПЛА між цими точками.

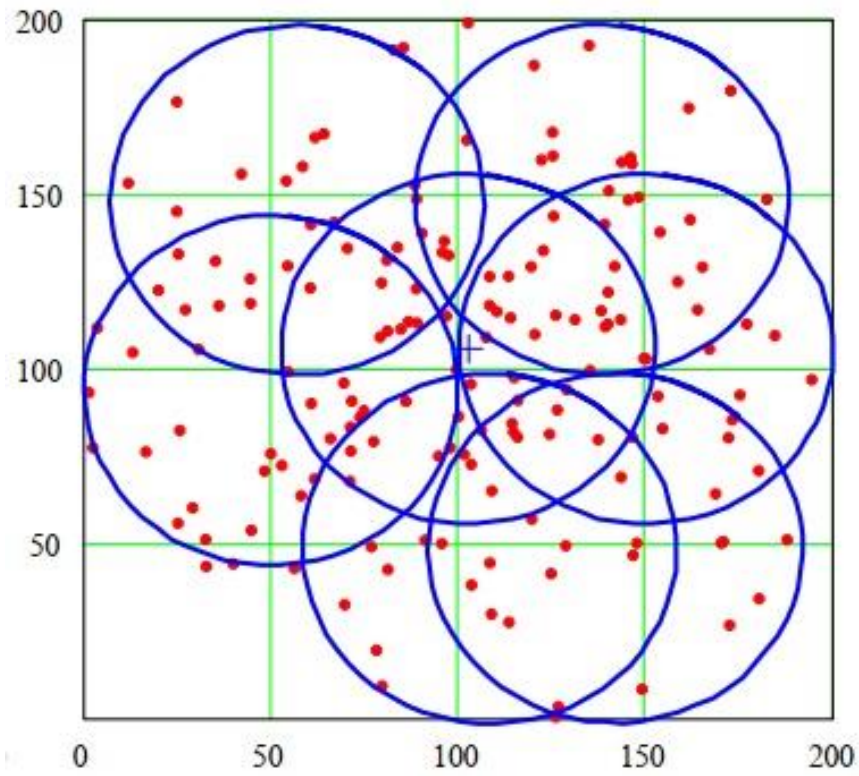


Рисунок 2.6 – Різний характер розміщення вузлів на території обслуговування

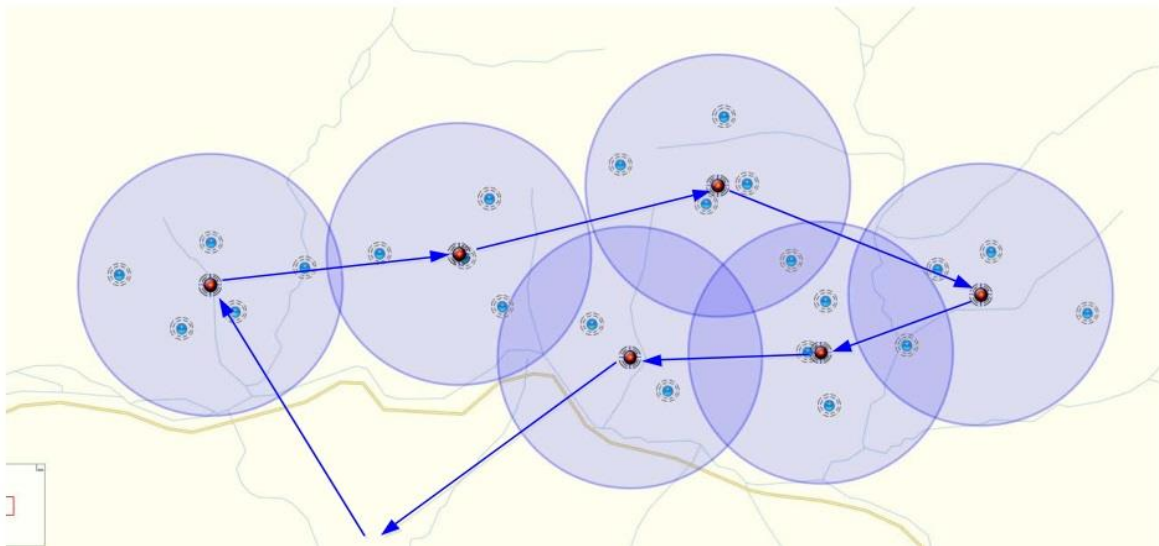


Рисунок 2.7 – Приклад траєкторії руху БПЛА при відомій топології мережі

Алгоритм FOREL вирішує завдання кластеризації, при вирішенні якої мінімізується сумарна квадратична відстань елементів кластерів (вузлів БСМ) від центрів мас цих кластерів. Мінімізуєма функція може бути записана як:

$$M = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (2.3)$$

де k – число кластерів;

S_i – множина елементів i -го кластера;

μ_i – координати центру мас i -го кластера;

x_j – координати центру мас i -го елемента кластера.

Значення являє собою евклідову відстань між елементом кластера і центром мас кластера. Погляньмо на цей алгоритм для двовимірного простору (площини). В даному випадку кожен елемент розглядається як точка на площині і характеризується своїми координатами (x_i, y_i) . Координати центру мас i -го кластера визначаються як:

$$x_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_j, \quad (2.4)$$

$$y_i^{(\mu)} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} y_j, \quad (2.5)$$

Також кожен об'єкт (точка) може характеризуватися крім координат деяким параметром («масою») – m_i . Тоді центр мас буде визначатися як (центр мас пласкої фігури):

$$x_i^{(\mu)} = \frac{1}{m_i^{(\Sigma)}} \sum_{j=1}^{n_i} m_j x_j, \quad (2.6)$$

$$y_i^{(\mu)} = \frac{1}{m_i^{(\Sigma)}} \sum_{j=1}^{n_i} m_j y_j, \quad (2.7)$$

$$m_i^{\Sigma} = \sum_{j \in S_i} m_j, \quad (2.8)$$

У FOREL задається розмір кластера R . У двовимірній задачі на геометричній площині під R розуміється максимальна відстань від елемента кластера до його центру мас (радіус).

Кожен елемент також розглядається як точка на площині і характеризується своїми координатами (x_i, y_i) .

Координати центру мас i -го кластеру визначаються згідно (2.6), (2.7) або (2.8).

Алгоритм кластеризації включає в себе наступні основні кроки.

Крок № 1. Задаються межі області, координати об'єктів (точок) $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ і максимальний розмір кластера (R), номер кластера $i = 1$.

Крок № 2. Вибирається випадкова точка m_i в заданій області. Цю точку на початковому етапі приймаємо за центр мас кластера.

Крок № 3. Всі об'єкти, що знаходяться на відстані не більше R , приписуються до даного кластеру.

Крок № 4. Для отриманого кластера обчислюється центр мас, відповідно до формул (2.6), (2.7) або (2.8) \hat{m}_i . Якщо обчислені координати центру мас збігаються з точкою m_i , то вважаємо, що кластер i визначено, всі приписані даному кластеру точки позначаються номером кластера і виключаються з подальшого розгляду. Переходимо до кроку 5 (пошук наступного кластера). Якщо обчислені координати центру мас не збігаються

з точкою, то процес пошуку триває, тобто приймаємо $m_i = \hat{m}_i$, перехід до кроку 3.

Крок № 5. Перевіряємо, чи залишилися об'єкти, не віднесені ні до одного кластеру. Якщо таких немає, то всі кластери визначені, завершення пошуку, перехід до кроку 6. Якщо об'єкти залишилися, то перехід до кроку 2 (пошук чергового кластера).

Крок № 6. Виводимо дані про приналежність об'єктів до кластерів, центр мас отриманих кластерів. Кінець пошуку.

Примітка. Під час пошуку чергового кластера може виявитися, що на видаленні менш R від обраного центру мас немає жодного об'єкта. В такому випадку слід зробити вибір нового центру мас (випадковий вибір).

Слід зазначити, що аналогічно кластеризації в двовимірному просторі це завдання можна вирішувати і для тривимірного простору, в разі, коли елементи мережі розташовані не на пласкій поверхні. Після рішення задачі вибору точок зняття даних необхідно знайти траєкторію руху БПЛА. Ймовірно, можна пред'являти різні вимоги до властивостей шуканої траєкторії, наприклад, такі як протяжність (довжина), число відвідуваних точок зняття даних, кут зміни напрямку руху, висота польоту і т.д. При вирішенні даного завдання будемо приймати в якості критерію тільки довжину шляху. Знайдені точки зняття даних представимо вершинами повного графу. Будемо вважати, що БПЛА може починати і закінчувати обліт точок збору в будь-яких точках над територією, що обслуговується. Ці точки можуть перебувати як в вершинах отриманого графа, так і поза графом. В останньому випадку граф повинен бути доповнений двома вершинами, що відповідають цим точкам. Можна показати, що якщо потрібно починати і закінчувати обліт в одній і тій же точці, то вона може бути представлена двома точками, відстань між якими дорівнює нулю. У загальному випадку шукана траєкторія являє собою маршрут, при русі по якому, при обході всіх вершин графу, довжина пройденого шляху мінімальна. Якщо довжина маршруту виявляється більше максимально допустимої (можливої дальності

польоту БПЛА або часу доставки даних), то слід відшукати кілька маршрутів, які забезпечують паралельне рішення даного завдання зняття даних. У загальному випадку рішення задачі, яка полягає у тому, щоб «стягнути» задане число вершин вихідного графа ребрами з мінімальною сумарною вагою, пов'язане з знаходженням мінімального дерева Штейнера (SMT). Відомо, що дана задача не має спільного рішення. Якщо доповнити вимоги до маршруту, зажадавши, щоб він проходив через кожен з вершин тільки один раз, то дана задача зводиться до задачі пошуку мінімального гамільтонового циклу або ланцюга (завдання комівояжера). Дане завдання відноситься до класу NP-складних задач. При відносно малому числі вершин графа вона може бути вирішена повним перебором можливих варіантів. Однак при зростанні числа вершин (розміру мережі) її складність зростає експоненціально.

2.3 Поиск оптимального маршрута движения БПЛА

При пошуку оптимального маршруту руху БПЛА вирішується математична задача комівояжера. Завдання комівояжера (від фр. *commis voyageur* – бродячий торговець, англ. *travelling salesman problem* – скорочено TSP) – задача комівояжера, яка полягає в знаходженні самого вигідного маршруту, що проходить через зазначені міста хоча б по одному разу з наступним поверненням в початкове місто. Завдання комівояжера є однією з найвідоміших задач комбінаторної оптимізації.

У класичній задачі комівояжера розглядається n міст і матриця попарних відстаней між ними.

Потрібно знайти такий порядок відвідування міст, щоб сумарна пройдена відстань була мінімальною, кожне місто відвідували рівно один раз і комівояжер повернувся в те місто, з якого почав свій маршрут. Іншими словами, в підвішеному повному графі потрібно знайти гамільтонів цикл мінімальної ваги. Існує кілька окремих випадків загальної постановки

завдання, зокрема геометрична задача комівояжера (також звана планарною або евклідовою, коли матриця відстаней відображає відстані між точками на площині), метрична задача комівояжера (коли на матриці вартостей виконується нерівність трикутника), симетричне і асиметричне завдання комівояжера. Також існує узагальнення завдання, так звана узагальнена задача комівояжера. Завдання комівояжера відноситься до класу NP - повних задач. Для кращого розуміння розглянемо існуючі класи складності завдань розпізнавання.

Клас P (від англ. polynomial) – клас задач поліноміальної складності. Такі задачі називаються такими, що практично вирішуються. Клас P складається із завдань розпізнавання, вирішуваних за поліноміальний час. Іншими словами, число елементарних операцій для вирішення таких завдань обмежена зверху поліномом від довжини записи вихідних даних.

Клас EXP (від англ. exponential) – клас задач експоненційної складності. У загальному випадку (тобто для вихідних даних, найбільш «незручних» для будь-якого з алгоритмів, що вирішують завдання) потрібно кількість операцій, що збільшується з ростом n, принаймні експоненціально.

Клас NP (від англ. non-deterministic polynomial) – недетермінованої поліноміальної складності. Клас NP містить завдання, які недетермінірована машина Тьюринга в змозі вирішити за поліноміальну кількість часу. Даний клас є більш широким і включає в себе всі завдання P-класу. У класі NP виділяють завдання, до яких можна звести будь-яку іншу задачу з класу NP за поліноміальний час. Такі завдання називаються NP-повними. У певному сенсі ці завдання утворюють підмножину «найскладніших» завдань в класі NP.

2.3.1 Подання задачі комівояжера у вигляді графа

Для можливості застосування математичного апарату для вирішення поставленої проблеми її необхідно подати у вигляді математичної моделі.

Проблему комівояжера можна представити у вигляді моделі на графі, тобто використовуючи вершини і ребра між ними. Таким чином, вершини графа відповідають вузлам, а ребра (i, j) між вершинами i та j – шляхи сполучення між цими вузлами. Кожному ребру (i, j) можна співставити критерій вигідності маршруту $c_{ij} \geq 0$, який можна розуміти як, наприклад: відстань між вузлами, час або необхідні енергетичні витрати на подолання даної відстані та ін. З метою спрощення завдання і гарантії існування маршруту зазвичай вважається, що модельний граф завдання є повністю зв'язковим, тобто що між довільною парою вершин існує ребро. У тих випадках, коли між окремими вузлами не існує повідомлення, цього можна досягти шляхом введення ребер з максимальною довжиною. Через велику довжину таке ребро ніколи не потрапить до оптимального маршруту, якщо він існує.

Гамільтоновим циклом називається маршрут, який проходить через кожен вузол графа рівно по одному разу. Таким чином, рішення задачі комівояжера - це знаходження гамільтонового циклу мінімальної ваги в повному зваженому графі. Залежно від того, який критерій вигідності маршруту співставляється величині ребер, розрізняють різні варіанти завдання, найважливішими з яких є симетрична і метрична задачі. У загальному випадку асиметрична задача комівояжера відрізняється тим, що вона моделюється орієнтованим графом, тобто для її вирішення слід також враховувати напрямки ребер графа. У разі симетричної задачі всі пари ребер між одними і тими ж вершинами мають однакову довжину, тобто для ребра (i, j) однакові довжини $c_{ij} = c_{ji}$, а модельований граф є неорієнтованим. У симетричному випадку кількість можливих маршрутів вдвічі менше асиметричного випадку. Симетричну задачу комівояжера називають метричною, якщо відносно довжин ребер виконується нерівність трикутника. Умовно кажучи, в таких завданнях обхідні шляхи довше прямих, тобто ребро від вершини i до вершини j ніколи не буває довшим шляху через проміжну вершину k : $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$.

2.3.2 Огляд існуючих методів вирішення задачі комівояжера

Метод повного перебору або інша назва – грубої сили. Точне рішення задачі комівояжера можна знайти методом повного перебору всіх можливих варіантів, тобто «вручну» обчислити довжини всіх можливих маршрутів і вибрати маршрут з найменшою довжиною. Однак навіть для невеликої кількості вузлів вирішувати задачу таким способом практично неможливо.

Для простого варіанту, симетричної задачі з n вузлами, існує $\frac{(n-1)!}{2}$

можливих маршрутів, тобто для 15 вузлів існує 43 мільярди маршрутів, а для 18 вузлів – вже 177 трильйонів. Таким чином, метод повного перебору з упевненістю можна назвати непридатним для знаходження рішення задачі комівояжера.

Метод випадкового перебору. Зазвичай, вибір рішення можна уявити послідовністю виборів. Якщо робити ці вибори за допомогою будь-якого випадкового механізму, то рішення знаходиться досить швидко, так що можна знаходити рішення багаторазово і запам'ятовувати найкраще з рішень, що зустрілися. Цей наївний підхід суттєво покращується, коли вдається врахувати у випадковому механізмі перспективність тих чи інших виборів, тобто комбінувати випадковий пошук з евристичним методом і методом локального пошуку.

Алгоритм штрафування вершин. У цьому алгоритмі використовується ідея перетворення матриці ваг графа, при якому різні категорії дерев штрафуються по-різному, але в той же час відносні ваги всіх дерев в межах однієї категорії не змінюються. Мета при цьому полягає в тому, щоб розділити різні категорії і зробити категорію гамільтонових ланцюгів менш штрафуваними, а тоді застосування алгоритму мінімального дерева автоматично призведе до найкоротшого гамільтонового ланцюга. Розглядається повний граф. До кожного елементу рядка або стовпця матриці ваг цього графа додається досить велика кількість. Виходить результуюча

матриця ваг. Далі знаходиться найкоротший остов графа. Якщо він виявляється гамільтоновим ланцюгом, то задача вирішена. Якщо ні, відбувається штрафування вершин, ступінь яких більше 2, після чого знову шукається найкоротший остов графа і т.д., поки не буде знайдено рішення.

Жадібні алгоритми. Жадібний алгоритм – алгоритм знаходження найкоротшої відстані шляхом вибору найкоротшого, ще не обраного ребра, за умови, що воно не утворює циклу з вже обраними ребрами. «Жадібним» цей алгоритм названий тому, що на останніх кроках доводиться жорстоко розплачуватися за «жадібність». До жадібних алгоритмів можна віднести такі методи, як метод найближчого сусіда, метод включення найближчого міста, метод найдешевшого включення.

Метод найближчого сусіда. Метод полягає в наступному: вузли послідовно включаються в маршрут, причому кожен черговий вузол, що включається, повинен бути найближчим до останнього вибраного вузла серед всіх інших, ще не включених до складу маршруту. Розглянемо приклад, який покаже неефективність даного методу. Нехай є мережа, вузли якої розташовані у вигляді ромба. Комівояжер стартує з вузла 1. Алгоритм найближчого вузла на наступному кроці додасть в маршрут вузол 2, потім 3, потім 4; на останньому кроці доведеться повертатися в вузол 1 по найдовшій діагоналі ромба. В результаті вийде не найкоротший, а найдовший шлях.

Метод найближчого міста. На кожному кроці алгоритму проводить припустимий маршрут по поточній підмножині пунктів обходу, вже включених в маршрут, додаючи до нього новий пункт з числа ще не включених в маршрут, для якого знайдеться найближчий сусід з числа пунктів, які вже належать маршруту обходу плану. Новий пункт включається в маршрут після свого сусіда, якому він зобов'язаний включенням. Ланки маршруту модифікуються так, щоб розширений маршрут був допустимим.

Метод найдешевшого включення. На кожному кроці алгоритму проводить припустимий маршрут по поточній підмножині пунктів обходу, вже включених в маршрут, додаючи до нього новий пункт, включення якого

між деякими суміжними пунктами приводить до мінімального збільшення вартості (довжини) маршруту. Серед вищезазначених жадібних алгоритмів за якістю оптимальності рішення найкращим є метод найдешевшого включення, однак він же вимагає максимальної обчислювальної трудомісткості. Найменш трудомістким з описаних жадібних алгоритмів є метод найближчого сусіда.

Метод мінімального остовного дерева (дерев'яний алгоритм). Дерев'яний алгоритм для вирішення завдання комівояжера наступний: на початковому графі мережі будується найкоротший кістяк і подвоюються всі його ребра. Результатом є зв'язний граф, вершини якого мають лише парні ступені. Потім будується ейлерів цикл, починаючи з вершини 1, цикл задається переліком вершин. Проглядається перелік вершин, починаючи з 1, і закреслюється кожна вершина, яка повторює вже додану в послідовність. Після цього залишається шлях, який і є результатом алгоритму. Доведено, що дерев'яний алгоритм помиляється менш ніж в два рази, тому такі алгоритми називають приблизними, а не просто евристичними.

Метод імітації відпалу. Назва даного алгоритму пов'язана з методами імітаційного моделювання в статистичній фізиці, заснованими на техніці Монте-Карло. Дослідження кристалічної решітки і поведінки атомів при повільному охолодженні тіла призвело до появи на світ імовірнісних алгоритмів, які виявилися надзвичайно ефективними в комбінаторній оптимізації. Алгоритм імітації відпалу відноситься до класу порогових алгоритмів локального пошуку. На кожному кроці цього алгоритму для поточного рішення ik в його околиці $N(ik)$ вибирається деяке рішення j , і якщо різниця по цільовій функції між новим і поточним рішенням не перевищує заданого порогу tk , то нове рішення j замінює поточне. В протилежному випадку вибирається нове сусіднє рішення.

Метод гілок і меж. Метод гілок і меж є одним з методів неявного перебору, в основі якого лежить ідея послідовного розбиття множини допустимих рішень. На кожному кроці методу елементи розбиття

(підмножини) піддаються аналізу на вміст оптимального рішення. Якщо розглядається задача на мінімум, то перевірка здійснюється шляхом порівняння нижньої оцінки значення цільової функції на даній підмножині з верхньої оцінкою функціоналу. В якості оцінки зверху використовується значення цільової функції на деякому допустимому рішенні. Допустиме рішення, що дає найменшу верхню оцінку, називають рекордом. Якщо оцінка знизу цільової функції на даній підмножині не менш оцінки зверху, то розглянута підмножина не містить рішення краще рекорду і може бути відкинута. Якщо значення цільової функції на черговому рішенні менше рекордного, то відбувається зміна рекорду.

Нехай підмножина рішень переглянута, якщо встановлено, що вона не містить рішення краще рекорду. Якщо переглянуті всі елементи розбиття, алгоритм завершує роботу, а поточний рекорд є оптимальним рішенням. В протилежному випадку серед елементів розбиття, які ще не переглянуті, вибирається безліч, що є в певному сенсі перспективним. Вона піддається розбивці (розгалуженню). Нові підмножини аналізуються за описаною вище схемою. Процес триває до тих пір, поки не будуть переглянуті всі елементи розбиття.

Метод генетичних алгоритмів. Генетичний алгоритм – це евристичний алгоритм пошуку, який використовується для вирішення завдань оптимізації та моделювання шляхом випадкового підбору, комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію. Даний алгоритм є різновидом еволюційних обчислень. Генетичні алгоритми служать головним чином для пошуку рішень в багатовимірних просторах пошуку. Загальна схема алгоритму складається з наступних кроків: ініціалізація початкового покоління; оцінка особин в поколінні за певними критеріями; відбір кращих з оцінених особин; схрещування особин для формування нового покоління; мутація особин нового покоління (можливі як невеликі зміни, так і створення абсолютно нової особини). Даний набір дій повторюється ітеративно, тим самим моделюючи

«еволюційний процес», що триває кілька життєвих циклів (поколінь), поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму. Таким критерієм може бути: знаходження глобального або субоптимального рішення; вичерпання числа поколінь, відпущених на еволюцію; вичерпання часу, відпущеного на еволюцію. Прикладом генетичного алгоритму може служити алгоритм мурашиної колонії. Алгоритми мурашки, або оптимізація за принципом мурашиної колонії, засновані на властивих мурашкам здібностях орієнтації у фізичному просторі і знаходженні оптимального шляху між мурашником і іншими об'єктами навколишнього середовища (зокрема, джерелом їжі). При цьому при знаходженні джерела мурахи позначають шлях до мурашника феромонами (які привертають інших мурах для проходження по даному шляху). Коли інші мурахи проходять по позначеному шляху і також знаходять джерело їжі, вони також позначають даний шлях, і концентрація феромонів шляху збільшується. Таким чином, чим більше мурах встигне пройти по шляху, тим більше концентрація феромонів на даному шляху і тим більша ймовірність того, що інші мурахи також виберуть даний шлях. Алгоритми мурашки особливо цікаві тому, що їх можна використовувати для вирішення не тільки статичних, але і динамічних проблем, наприклад, в змінних мережах.

Вихідні дані вибору методів пошуку маршруту руху БПЛА. Будемо вважати, що граф неорієнтований. Таке припущення допустимо, коли немає обмежень на напрямок руху БПЛА над територією обслуговування. Для завдання точок початку і кінця маршруту доповнимо вихідний граф двома вершинами x_s і x_t відповідно.

Вважаємо, що координати точок x_s і x_t відомі, отже, можуть бути обчислені і відстані від них до всіх інших вершин графа. Будемо вважати, що рішенням завдання є маршрут між заданими вершинами x_s і x_t , який проходить через всі вершини графа. Вважаємо, що маршрут повинен починатися в вершині x_s і закінчуватися в вершині x_t , а також проходити через кожну з вершин графа тільки один раз, довжина маршруту повинна

бути мінімальна.

При даних обмеженнях, рішенням завдання буде найкоротший гамільтоновий ланцюг (маршрут комівояжера). Для її вирішення можуть бути використані різні методи, точні – повного перебору або наближені, наприклад алгоритм, який використовує дерево рішень, або алгоритм штрафування вершин. Точні методи вимагають невеликої кількості обчислень, тому, з урахуванням наявних вимог і простоти реалізації, віддамо перевагу алгоритму штрафування вершин (алгоритму Крістофідеса).

Цей алгоритм має відносно просту реалізацію та забезпечує збіжність до оптимального рішення в більшості випадків. У разі незбіжності алгоритму до оптимального рішення може бути отримано близьке до оптимального рішення. Метод, який реалізується алгоритмом штрафування вершин, заснований на послідовному пошуку найкоротших кістяків графа (SST) і «штрафування» вершин в них, ступінь яких перевищує 2. Результатом виконання алгоритму є найкоротший остов графа, всі вершини якого, крім вершин які мають ступінь 2, тобто шуканий маршрут, довжина якого близька до довжини гамільтонового ланцюга.

Якщо в задачі потрібно побудувати кілька маршрутів, то вихідний повний граф може бути розділений на необхідне число повних підграфів, для кожного з яких повинна бути вирішена задача пошуку оптимальних маршрутів руху БПЛА.

Пошук маршруту алгоритмом штрафування вершин. Вважаємо, що граф заданий матрицею довжин ребер:

$$C_0 = \|c_{ij}\|, \quad c_{ij} < \infty, \quad i, j = 1 \dots k, \quad (2.9)$$

де k – число вершин графа.

Замінімо значення в рядках або стовпцях $i = s$ та $i = t$ або $j = s$ та $j = t$ значеннями:

$$c_{is} = c_{is} + N, \quad i = 1 \dots k, \quad (2.10)$$

$$c_{js} = c_{js} + N, \quad j = 1 \dots k,$$

де N – досить велике число, тобто.:

$$N \gg c_{ij}, \quad i, j = 1 \dots k, \quad (2.11)$$

Отримаємо результуючу матрицю:

$$C = \|c_{ij}\|, \quad i, j = 1 \dots k, \quad (2.12)$$

Далі знаходимо найкоротший остов по матриці C . Якщо він є гамільтоновим ланцюгом, тобто кожна з вершин графа, крім s і t , має ступінь, рівну 2, то задача вирішена. Якщо немає, то «оштрафуємо» ті вершини графа, ступеня яких перевищують 2. Якщо вершина r має ступінь більше 2, то:

$$c_{ir} = c_{ir} + \eta \cdot (c_{ir} - 2), \quad i, r = 1 \dots k, \quad (2.13)$$

де η – величина штрафу.

Для оновленої матриці C знову знаходиться найкоротший остов і проводиться перевірка на гамільтоновий ланцюг. Ітерації повторюються, поки черговий найкоротший остов не становитиме гамільтоновий ланцюг, останній і є рішенням задачі. У загальному випадку, якщо число ітерацій занадто велике, а найкоротший ланцюг ще не знайдений, то ітераційний процес може бути зупинений, а для пошуку використаний інший метод.

Слід зазначити, що відмінна від нуля ймовірність того, що пошук не зійдеться до оптимального рішення, характерна для багатьох відомих

методів. Дана проблема вимагає подальшого вивчення, проте в рамках розв'язуваної задачі в якості практичного вирішення можна запропонувати в такому випадку модифікувати вихідний граф, наприклад, додаванням нової вершини з випадковими координатами або зміною координат вершин, ступінь яких перевищує 2, на випадкову величину, що лежить в межах точності їх оцінки.

Останнє фактично еквівалентно штрафуванню вершини на деяку випадкову величину. У разі незбіжності алгоритму і в такому випадку, тобто для гарантованого отримання маршруту, можливо використовувати, наприклад, евристичний метод «найближчого сусіда», який дає менш точне розв'язання, але гарантує отримання рішення.

Можливість отримання рішення задачі залежить від того, чи існує шуканий гамільтонів цикл (або ланцюг), і від збіжності алгоритму. Необхідна умова існування гамільтонового циклу впливає з його визначення і полягає в тому, що всі вершини вихідного графа повинні мати ступінь не менше 2. В якості достатньої умови можна використовувати умову Поша, яка полягає в тому, що якщо число вершин графа $n > 2$ і якщо для будь-якого k , $0 < k < \frac{n-1}{2}$ число вершин зі ступенями, що не перевершують k , не перевищує k , то граф містить гамільтоновий ланцюг.

Суттєва особливість даного завдання полягає в тому, що вихідний граф є повним, тобто кожна вершина пов'язана з кожною, отже, кожна вершина має ступінь. У цьому випадку умова Поша виконується, отже, будь-який можливий граф є гамільтоновим графом. У цьому випадку можливість отримання рішення залежить тільки від збіжності алгоритму пошуку маршруту (гамільтонового ланцюга).

Збіжність і час виконання алгоритму штрафування вершин істотно залежать від величини штрафу. При занадто малій величині штрафу потрібна більша кількість ітерацій, а при великій величині штрафу алгоритм може не сходитися.

Таким чином, в рамках даної роботи проводиться дослідження та порівняльний аналіз трьох наближених методів рішення задачі комівояжера для пошуку найкоротшого шляху по точкам:

- метод штрафування вершин штрафами постійної величини;
- метод штрафування вершин штрафами випадкової величини (модифікація методу 1);
- метод найближчого сусіда.

Перераховані вище методи були обрані зважаючи на простоту їх реалізації, високий ступінь збіжності і близькості одержуваного шляху до оптимального.

3 ПРОВЕДЕННЯ ТЕСТУВАННЯ ОБРАНИХ МЕТОДІВ

Як засіб для тестування розглянутих методів вибору, найкоротшою траєкторією руху була використана програма, яка написана на мові C # за допомогою середовища розробки Visual Studio.

Visual Studio – це безкоштовна, повнофункціональне і розширюване інтегроване середовище розробки для створення сучасних додатків для Windows, Android і iOS, а також web-додатків і cloud служб. Даний продукт дозволяє розробляти як консольні застосунки, так і застосунки з графічним інтерфейсом, в тому числі з підтримкою технології Windows Forms, а також web-сайти, web-додатки, web-служби як в рідному, так і в керованому кодах для всіх платформ, підтримуваних Windows, Windows Mobile, Xbox, Windows Phone.NET Compact Framework та Silverlight. Інтерфейс програми тестування показаний на рисунку 3.1.

Програма дозволяє задати необхідну кількість вузлів наземного сегмента мережі, через які необхідно побудувати маршрут і які є вершинами графа (в інтерфейсі програми – параметр n); згенерувати випадкове розташування даних вузлів на площині (в рамках завдання – в наземному сегменті мережі ЛСМ); провести експеримент по знаходженню найкоротшого шляху через ці точки, використовуючи один з трьох методів вибору найкоротшого маршруту: методу штрафування вершин, його модифікації з «випадковими штрафами» і методу «найближчого сусіда». У ході виконання розрахунків програма відображає вихідне розташування вузлів наземного сегмента мережі, отриманий шлях через всі вузли, розраховану матрицю відстаней між вузлами, через які проходить шлях, отриману довжину шляху і кількість ітерацій, після яких був розрахований шлях. Для аналізу збіжності алгоритму і часу його виконання були проведені випробування на досить великому наборі випадкових повних графів різної

розмірності.

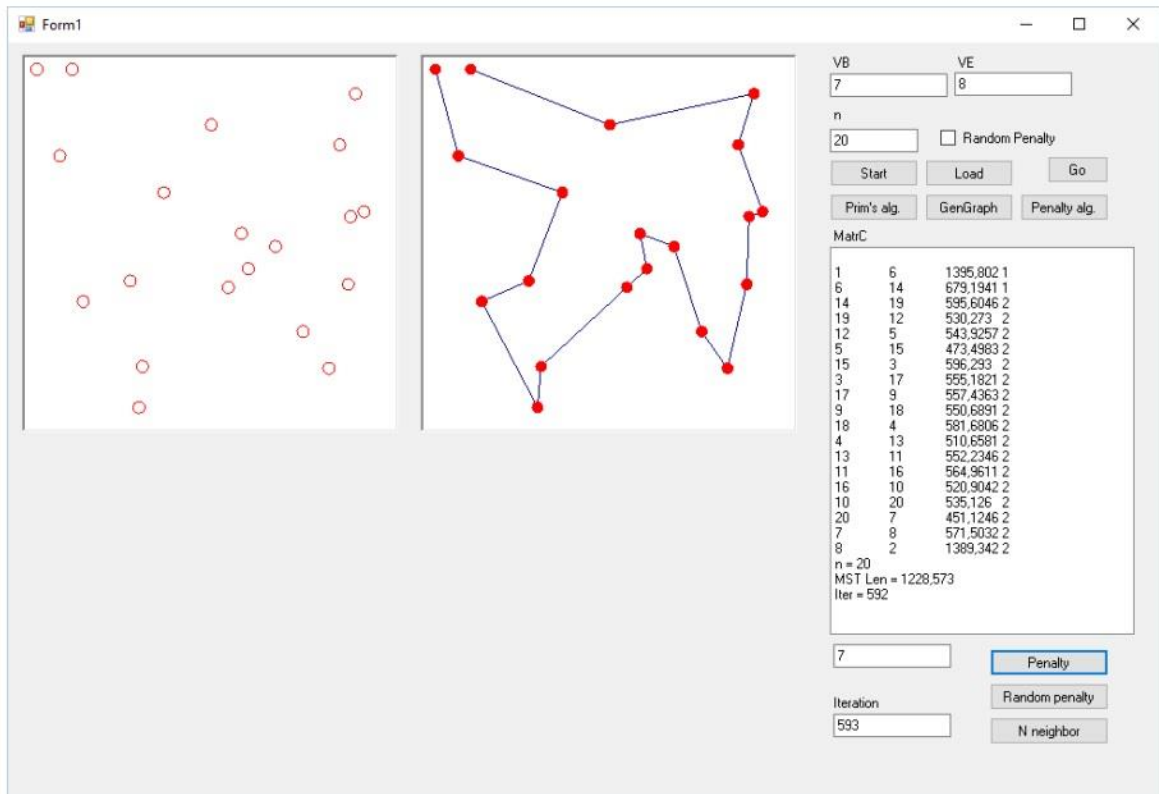


Рисунок 3.1 – Інтерфейс програми тестування

При цьому використовувалися постійні позитивні штрафи. Величина вибиралася виходячи з розподілу довжин ребер вихідного графа. Нижче наведені результати тестування алгоритмів штрафування вершин, його модифікації з «випадковими штрафами» і метод «найближчого сусіда». Тестування було виконано на графах різної розмірності від 10 до 60, для кожного з розмірів було проведено 20 тестувань на випадкових графах. Вершини випадкового графа представляли собою пуассонівське поле точок на площині, в області, обмеженою квадратом, а довжини ребер – відстані між ними. На рисунку 3.2 наведено приклад знайденого маршруту в графі з 60 вершин. У прикладі: вихідне поле точок, маршрут, знайдений методом «постійних штрафів». Для методу «випадкових штрафів» наведені два варіанти вирішення.

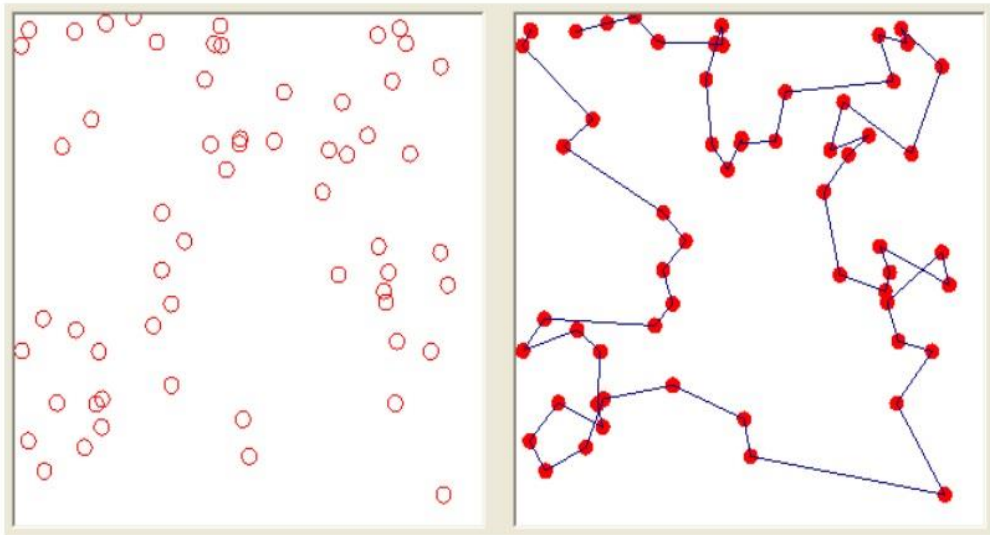


Рисунок 3.2 – Приклад знайденого гамільтонового ланцюга в графі з 60 вершин

За результатами тестування були отримані оцінки ймовірності збіжності алгоритмів і похибка довжини отриманого шляху по відношенню до методу «штрафування вершин» з постійними штрафами, які наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати тестування алгоритмів пошуку оптимального шляху

Число вершин	Постійні штрафи		Випадкові штрафи		Метод «найближчого сусіда»
	Імовірність збіжності	Середнє число ітерацій	Середнє число ітерацій	Відносна помилка довжини шляху	Відносна помилка довжини шляху
1	2	3	4	5	6
10	1	95	94	0.91	12.92
20	1	610	147	3.72	17.05

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
30	1	4106	235	7.8	21.52
40	0.9	10426	1168	20.87	26.14
50	0.45	13475	1861	34.22	22.68
60	0.15	15573	2426	38.33	21.57

На рисунку 3.3 наведено приклади результатів пошуку шляху «Початкове поле, кількість вершин дорівнює 30».

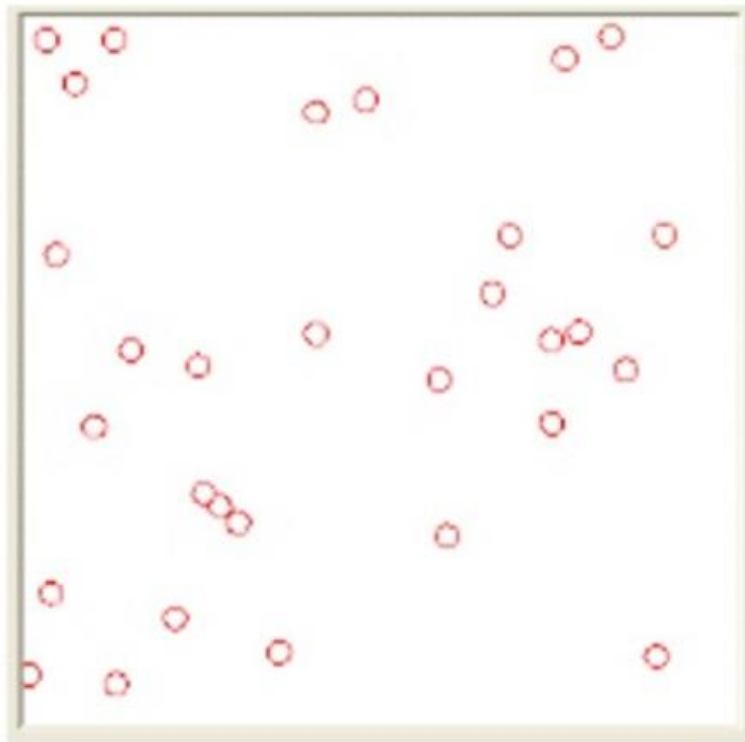


Рисунок 3.3 – Приклади результатів пошуку шляху «Початкове поле, кількість вершин дорівнює 30»

На рисунку 3.4 наведено приклади результатів пошуку найкоротшого шляху БПЛА методом «Постійні штрафи», $L = 1508.1$, а на рисунку 3.5 – приклади результатів пошуку найкоротшого шляху БПЛА методом «Випадкові штрафи», $L = 1575.9$

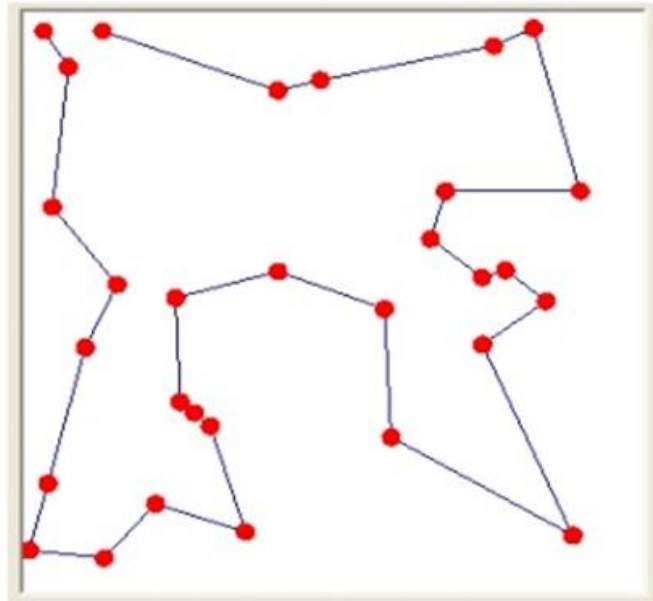


Рисунок 3.4 – Приклади результатів пошуку найкоротшого шляху БПЛА методом «Постійні штрафи», $L = 1508.1$

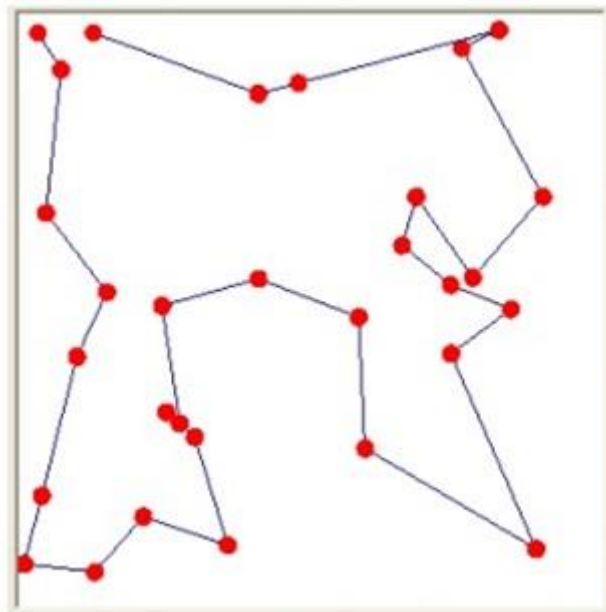


Рисунок 3.5 – Приклади результатів пошуку найкоротшого шляху БПЛА методом «Випадкові штрафи», $L = 1575.9$

На рисунку 3.6 наведено приклади результатів пошуку найкоротшого шляху БПЛА методом «Найближчий сусід», $L = 1955.5$

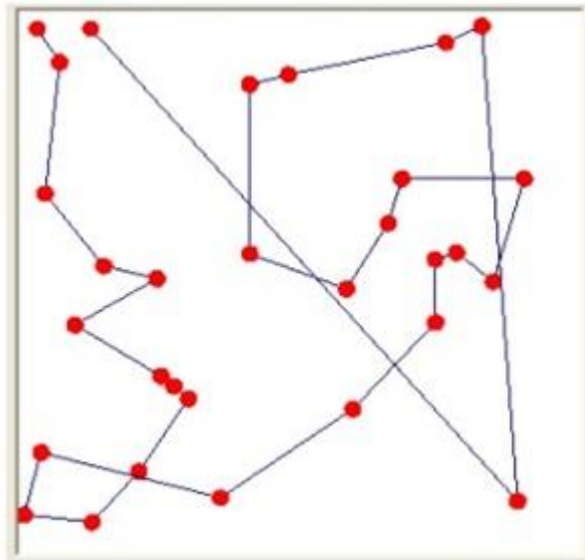


Рисунок 3.6 – Приклади результатів пошуку найкоротшого шляху БПЛА методом «Найближчий сусід», $L = 1955.5$

На рисунку 3.7 наведена залежність ймовірності збіжності для методу «Постійних штрафів» від числа вершин графа.

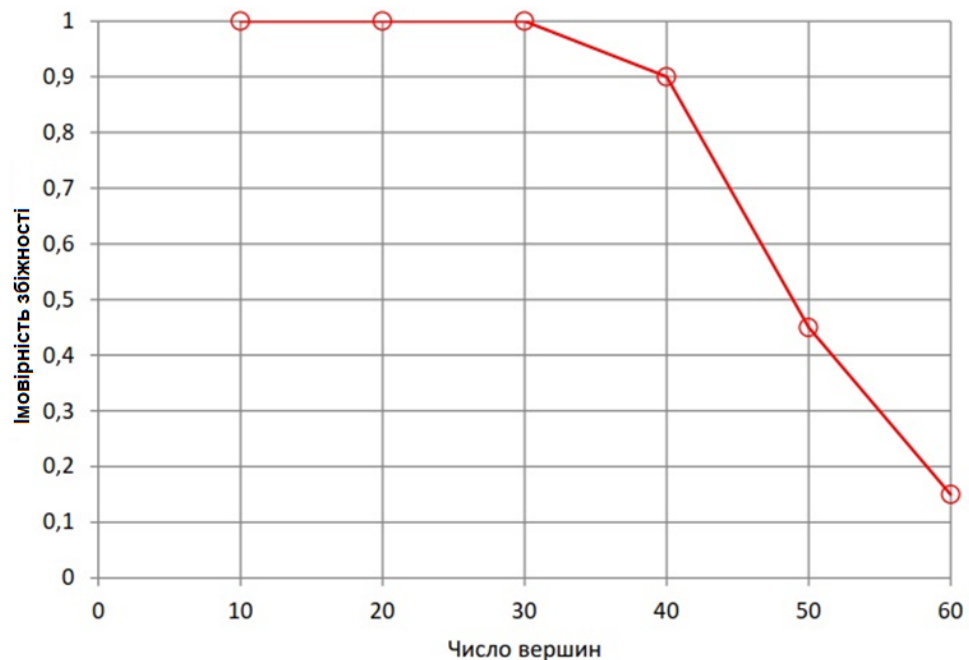


Рисунок 3.7 – Залежність ймовірності збіжності для методу «Постійних штрафів» від числа вершин графа

Слід зазначити, що можливо ще поліпшити результати роботи алгоритму, що іменується в даній роботі методом «Постійних штрафів», вибравши більш ефективну стратегію «штрафування» вершин. У даній роботі згадані модифікації даного методу не розглядалися. Ймовірно, ці модифікації покращать його збіжність, але істотно не зменшать його обчислювальну складність.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи були дослідженні методи вибору оптимального маршруту для збору даних у мобільній сенсорній мережі для Vanet за допомогою БПЛА. Проведено аналіз варіантів взаємодії БПЛА з вузлами наземної сенсорної мережі. Проведено аналіз методів пошуку оптимального маршруту руху БПЛА. При пошуку оптимального маршруту руху БПЛА вирішувалася математична задача комівояжера. Було показано, що існує кілька окремих випадків загальної постановки завдання, зокрема геометрична задача комівояжера (так звана планарна або евклідова, коли матриця відстаней відображає відстані між точками на площині), метрична задача комівояжера (коли на матриці вартостей виконується нерівність трикутника), симетрична і асиметрична задача комівояжера.

Таким чином, в рамках даної роботи проводились дослідження та порівняльний аналіз трьох наближених методів рішення задачі комівояжера для пошуку найкоротшого шляху руху БПЛА по точках:

- метод штрафування вершин штрафами постійної величини;
- метод штрафування вершин штрафами випадкової величини;
- метод найближчого сусіда.

Для тестування розглянутих методів вибору найкоротшої траєкторії руху БПЛА була використана програма, яка написана мовою C# за допомогою середовища розробки Visual Studio.

В ході виконання розрахунків програма відображає вихідне розташування вузлів наземного сегмента мережі, отриманий шлях через всі вузли, розраховану матрицю відстаней між вузлами, через які проходить шлях, отриману довжину шляху і кількість ітерацій, після яких був розрахований шлях БПЛА.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедев В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер-сенсорна мережа» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. Радченко В.О., Руденко Д.А., Ткачов В.Н., Токарев В.В. Мобильная подсистема «Мультикоптер-сенсорная сеть» в компьютерной системе хранения BIG DATA / В.О. Радченко, Д.А. Руденко, В.Н. Ткачов, В.В. Токарев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №4(44). - С.102-105.
3. Пат. 118921 Україна, МПК H04W 64/00. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією / В.М. Ткачов, В.В. Токарев - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
4. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Мобильная система передачи данных на базе динамически реконфигурируемых мультикоптерных устройств / В.А. Радченко, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
5. Рубан И.В., Чурюмов Г.И., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Функциональная стойкость универсальной мобильной реконфигурируемой системы при воздействии электромагнитного излучения высокой мощности / И.В. Рубан, Г.И. Чурюмов, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Информационные технологии и безопасность: (ИТБ-2017), материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции, 30 нояб. 2017г. - Киев, 2017. - С.205 - 210.
6. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу

потужного НВЧ випромінювання: звіт про НДР (заключ.) № держреєстрації 0117U003916.: Ф76/109-2017 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник Г. І. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.

7. Ruban I.V., Churyumov G.I., Tokarev V.V., Tkachov V.M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / I.V. Ruban, G.I. Churyumov, V.V. Tokarev, V.M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security: (ITS 2017). CEUR Workshop Processing., 30 nov. 2017 y. - Kyiv, 2017. - P. 105-111.

8. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev, W. Nannan // The 10h IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)., 5-7 june, 2019 y. - Leeds, 2019. - P.26 - 29.

9. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токарев В. В., Наннан Ванг. Надширокосмугові технології в системах управління мобільними об'єктами. / О. А. Серков, П. Є. Пустовойтов, І. В. Яковенко, Б. О. Лазуренко, Г. І. Чурюмов, В. В. Токарев, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.

10. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів / О.А. Серков, В.В. Князев, Б.О. Лазуренко, І.В. Яковенко, Г.І. Чурюмов, В.В. Токарев // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС-2019):збірник наукових робіт четвертої міжн. наук.-техн. конф., 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - С. 55-57.

11. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Щербак В.К. Моделирование компьютеризированных систем управления с использованием интеллектуальных средств / Г.Ф. Кривуля, В.В. Токарев, В.К. Щербак //

Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповідей 32-ї міжн. наук.-практ. конф., 24-25 жовт. 2019р. - Харків, 2019. - С. 90 - 91.

12. Krivoulya G., Tokariiev V., Iina I, Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic / G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Iina, V. Shcherbak // IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - P.197 - 201.

13. Лебедев О.Г., Ткачев В.Н., Токарев В.В., Чурюмов Г.И. Темпоральная модель адаптации интегрированной информационной системы путем реконфигурации логической структуры / О.Г. Лебедев, В.Н. Ткачев, В.В. Токарев, Г.И. Чурюмов // Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: тези доповідей другої міжн. наук. - техн. конф., 18 - 19 квітн. 2018 р. - Харків, 2018. - С.6-7.

14. Крят Д.С. Модель мобільної сенсорної мережі для Vanet / Д.С. Крят // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 12 жовтн. 2021р. - Тернопіль: 2021. - випуск 62. - С.35 - 36.