

Міністерство освіти і науки України  
Західноукраїнський національний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

СТАСИШИН ОЛЕГ ВАСИЛЬОВИЧ

ЗБІР ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА В БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ /  
UAV-ASSISTED DATA COLLECTION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

спеціальність: 174 — Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
освітньо-професійна програма - Автоматизація та програма комп'ютерно-  
інтегровані технології

Магістерська робота

Виконав студент групи АКІТм-21  
О.В. Стасишин

---

Науковий керівник:  
к.т.н., О.М. Заставний

---

Магістерську роботу допущено до захисту:  
"\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2025р.

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ А.І. Сегін

Тернопіль 2025

Західноукраїнський національний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
Освітній ступінь "магістр"  
спеціальність: 174 — Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
освітньо-професійна програма - Автоматизація та програма комп'ютерно-  
інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

\_\_\_\_\_ А. І. Сегін  
"\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Стацишин Олег Васильович

(прізвище, ім'я по-батькові)

**1. Тема кваліфікаційної роботи**

Збір даних за допомогою БПЛА в бездротових сенсорних мережах / UAV-  
Assisted Data Collection in Wireless Sensor Networks

керівник роботи к.т.н., О.М. Заставний

затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024 р.  
№ 938

**2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи**

1 грудня 2025р.

**3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:**

1. Системи моніторингу віддалених об'єктів за допомогою безпроводних  
сенсорних мереж

2. Системи збору даних за допомогою БПЛА

3. Дизайн траєкторії для збору даних та оптимізації роботи системи збору  
інформації за допомогою БПЛА

**4. Основні питання, які потрібно розробити**

1. Аналіз систем збору даних за допомогою БПЛА

2. Збір даних розподіленої SDWSN на основі БПЛА

3. Тестування роботи алгоритму системи збору даних за допомогою БПЛА

**5. Перелік графічного матеріалу у роботі**

1. Топологічна схема збору даних бездротової сенсорної мережі

2. Розподіл мережевих компонентів на етапі попередньої оркестрації  
сканування БПЛА

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	О.М. Заставний, ст.викл кафедри СКС		
2	О.М. Заставний, ст.викл кафедри СКС		
3	О.М. Заставний, ст.викл кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 2 грудня 2024р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	1. Аналіз сучасних підходів до організації бездротових сенсорних мереж та використання БПЛА	12.2024р. – 02.2025р.	виконано
2	2. Збір даних розподіленої SDWSN на основі БПЛА	03.2025р. – 06.2025р.	виконано
3	3. Тестування роботи алгоритму системи збору даних за допомогою БПЛА	07.2025р. – 11.2025р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату та виправлення недоліків	11.2025-12.2025	виконано

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

О.В. Стасишин

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

к.т.н., О.М. Заставний

## АНОТАЦІЯ

Сташишин Олег Васильович. Збір даних за допомогою БПЛА в бездротових сенсорних мережах.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 — Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна програма - Автоматизація та програма комп'ютерно-інтегровані технології. - Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2025.

Магістерська робота присвячена дослідженню та розробці методів збору даних за допомогою безпілотних літальних апаратів у бездротових сенсорних мережах. У роботі проаналізовано особливості функціонування бездротових сенсорних мереж, основні проблеми традиційних підходів до збору інформації та обґрунтовано доцільність використання БПЛА як мобільних колекторів даних. Запропоновано методи оптимізації траєкторій польоту БПЛА та вдосконалені алгоритми кластеризації сенсорних вузлів з урахуванням енергоефективності й балансування навантаження в мережі. Проведено моделювання роботи системи та оцінено ефективність запропонованих рішень за показниками енергоспоживання, надійності та продуктивності. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та впровадженні систем моніторингу в екологічній, аграрній, промисловій та інфраструктурній сферах.

## ANNOTATION

Stasyshyn O. V. UAV-assisted data collection in wireless sensor networks.

Research for obtaining a master's degree in the specialty 174- Automation computer-integrated technologies and robotics, educational and professional program- Automation and computer-integrated technologies. - Western Ukrainian National University, Ternopil. 2025.

The master's thesis is devoted to the study and development of data collection methods using unmanned aerial vehicles (UAVs) in wireless sensor networks. The paper analyzes the features of wireless sensor network operation, the main problems of traditional data collection approaches, and substantiates the feasibility of using UAVs as mobile data collectors. Methods for optimizing UAV flight trajectories and improved clustering algorithms for sensor nodes are proposed, taking into account energy efficiency and load balancing in the network. System operation is modeled, and the effectiveness of the proposed solutions is evaluated in terms of energy consumption, reliability, and performance. The obtained results can be used in the design and implementation of monitoring systems in environmental, agricultural, industrial, and infrastructure applications.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТА ВИКОРИСТАННЯ БПЛА .....	10
1.1 Бездротові сенсорні мережі: структура, принципи роботи та сфери застосування .....	10
1.2 Проблеми збору даних у традиційних бездротових сенсорних мережах ..	13
1.3 Застосування БПЛА у системах моніторингу та збирання інформації.....	15
1.4 Інтеграція БПЛА з бездротовими сенсорними мережами.....	16
1.5 Застосування БПЛА в екологічному, промисловому та кризовому моніторингу .....	17
2. ЗБІР ДАНИХ РОЗПОДІЛЕНОЇ SDWSN НА ОСНОВІ БПЛА .....	19
2.1 Організація розподіленої системи SDWSN .....	19
2.2 Система мережевого зв'язку .....	22
2.3 Різні ролі в мережевій системі .....	24
2.4 Модель споживання енергії для комунікаційної мережі .....	27
3. ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ АЛГОРИТМУ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА .....	33
3.1 Розроблення нечіткого дизайну шляхів .....	33
3.2 Моделювання наземної мережі на основі стратегії SDWSN .....	35
3.3 Моделювання зв'язку "повітря-земля" на основі стратегії SDWSN.....	44
ВИСНОВКИ.....	54
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

## ВСТУП

**Актуальність теми** зумовлена швидким розвитком технологій Інтернету речей, зростанням обсягів даних та потребою в ефективних, гнучких і енергоощадних методах отримання інформації в розподілених системах моніторингу. Традиційні підходи до збору даних у бездротових сенсорних мережах (БСМ) часто стикаються з проблемами: обмеженим радіусом дії вузлів, низькою енергетичною автономністю, складністю розгортання мереж у важкодоступних або небезпечних зонах.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) відкривають нові можливості для подолання цих обмежень, забезпечуючи мобільність, адаптивність та здатність здійснювати цілеспрямований збір інформації у широкому діапазоні умов. Використання БПЛА як мобільних колекторів даних дозволяє підвищити надійність мережі, зменшити енергоспоживання сенсорних вузлів, оптимізувати маршрути передачі та покращити масштабованість системи.

Актуальність теми підсилюється також зростаючим попитом на рішення для екологічного моніторингу, аграрної сфери, інфраструктурних інспекцій, надзвичайних ситуацій та військових застосувань, де швидкий і точний збір даних є критично важливим. У цих умовах дослідження алгоритмів, методів планування траєкторій, оптимізації енергоспоживання та підвищення якості зв'язку між БПЛА та сенсорними вузлами має значну наукову та практичну цінність.

Таким чином, робота над системами збору даних за допомогою БПЛА в БСМ є актуальною через потребу у вдосконаленні сучасних технологій моніторингу, підвищенні ефективності IoT-систем та розробці інтелектуальних рішень, здатних працювати в реальних, часто складних умовах.

**Мета кваліфікаційної роботи.** Метою кваліфікаційної роботи є розроблення та дослідження методів і алгоритмів ефективного збору даних за допомогою безпілотних літальних апаратів у бездротових сенсорних мережах, що забезпечують підвищення енергоефективності сенсорних вузлів, оптимізацію

процесу збору інформації та покращення надійності роботи мережі у різних умовах експлуатації.

**Об’єкт дослідження:** Об’єктом дослідження є процеси збору, передачі та обробки даних у розподілених сенсорних мережах із використанням безпілотних літальних апаратів.

**Предметом дослідження** є методи та алгоритми оптимізації розташування сенсорів, кластеризації мережі, планування траєкторій польотів безпілотних літальних апаратів і маршрутизації даних для підвищення ефективності та надійності автоматизованої системи збору даних.

**Наукова новизна одержаних результатів:** полягає у розробці методів оптимізації траєкторій польоту безпілотних літальних апаратів для збору даних з бездротових сенсорних мереж з урахуванням енергоефективності сенсорних вузлів та балансування навантаження в мережі, а також у вдосконаленні алгоритмів кластеризації сенсорних вузлів, що забезпечує підвищення надійності, продуктивності та тривалості функціонування системи в умовах обмежених енергетичних і обчислювальних ресурсів.

**Практичне значення отриманих результатів:** полягає у можливості використання розроблених методів і алгоритмів збору даних за допомогою безпілотних літальних апаратів у бездротових сенсорних мережах під час проектування та впровадження систем моніторингу різного призначення. Запропоновані рішення можуть бути застосовані для підвищення енергоефективності сенсорних вузлів, зменшення затримок передачі інформації та покращення надійності роботи мережі в умовах обмежених ресурсів. Отримані результати доцільно використовувати у системах екологічного та аграрного моніторингу, промислового контролю, моніторингу інфраструктурних об’єктів, а також під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

#### **Апробація.**

1. Стасишин О.В., Носанчук О.О. Система збору даних в бездротових мережах з використанням БПЛА // Матеріали III-ї всеукраїнської науково-

практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ – 2025). – С118-120.

2. Сташишин О.В., Носанчук О.О., Заставний О.М. Енергоефективний збір даних у бездротових сенсорних мережах із використанням БПЛА на основі програмно-визначеної архітектури // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (ТІР:СТ - 2025), Тернопіль, 2025. -С.114-116.

# 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТА ВИКОРИСТАННЯ БПЛА

## 1.1 Бездротові сенсорні мережі: структура, принципи роботи та сфери застосування

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) є однією з ключових технологій сучасних інформаційно-комунікаційних систем, забезпечуючи можливість збору даних у реальному часі в широкому спектрі застосувань — від моніторингу навколишнього середовища до промислових та військових систем керування [1]. Вони складаються з множини мікроелектронних сенсорних вузлів, розміщених у певній зоні для спостереження за фізичними або хімічними параметрами середовища, такими як температура, вологість, світлові умови, тиск, рівень забруднення чи вібрації [2]. Кожен вузол обладнаний сенсорним модулем, модулем обробки, модулем бездротової комунікації та джерелом живлення, найчастіше — малогабаритною батареєю, що визначає критичну залежність БСМ від енергоощадних рішень [3].

Типова структура бездротової сенсорної мережі включає три основні компоненти: сенсорні вузли, проміжні ретранслятори (за необхідності) та центральний вузол збору даних [4] (рисунок 1.1). Сенсорні вузли — це мініатюрні автономні пристрої, здатні не лише вимірювати параметри довкілля, але й виконувати базову локальну обробку даних, що зменшує навантаження на мережу та підвищує енергоефективність [4].

Архітектура БСМ може бути однохоповою або багатохоповою. В однохопових мережах кожен вузол передає дані безпосередньо до кінцевого вузла, що ефективно на невеликих площах та в умовах прямої видимості [2]. У багатохопових мережах інформація передається між вузлами до досягненням кінцевого вузла через проміжні вузли, що забезпечує масштабованість на великих територіях, але вимагає розумного балансування навантаження між вузлами, щоб уникнути швидкого вичерпання енергії центральних елементів [4].

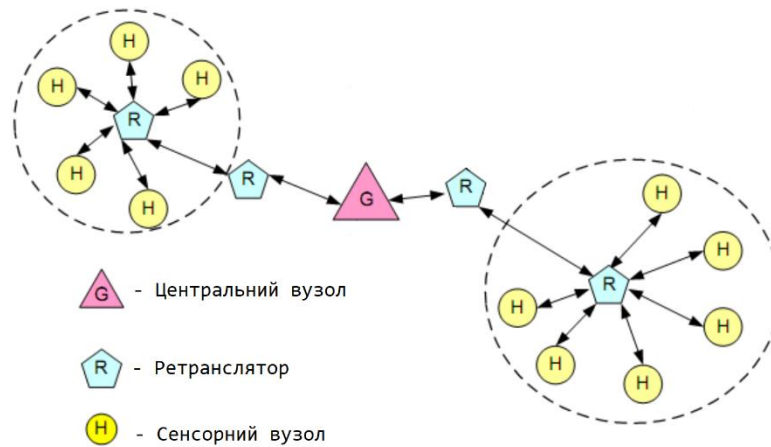


Рисунок 1.1 – Типова структура БСМ

Важливою особливістю структури БСМ є здатність до самоорганізації. Оскільки мережа часто розгортається у важкодоступних місцях без можливості ручного налаштування кожного вузла, алгоритми автоконфігурації дозволяють вузлам автоматично визначати своїх сусідів, роль у мережі, маршрути комунікації та змінювати їх залежно від змін у топології [7]. Розподілений характер роботи забезпечує відмовостійкість, адже вихід з ладу окремих вузлів не призводить до загального порушення функціонування системи [8].

Існують різні топології організації сенсорних мереж: зіркоподібна, кластерна, деревоподібна, сіткова. Найпоширенішою є кластерна архітектура, у якій сенсорні вузли групуються у кластери, а в кожному кластері обирається кластерний голова (cluster head), який виконує роль агрегатора даних та проміжного ретранслятора [9]. Такий підхід зменшує загальну кількість передач у мережі, а отже — і споживання енергії.

Функціонування БСМ базується на циклі, що включає збір даних, їхню локальну обробку, маршрутизацію та передачу до кінцевого вузла. Сенсорні вузли працюють у режимах зниженого енергоспоживання та переключаються між активним, пасивним та сплячим станами, що дозволяє подовжити їхній строк служби [11].

Для передачі інформації використовуються протоколи, оптимізовані під обмежені ресурси, такі як IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART [12].

Вибір протоколу залежить від вимог до швидкості передачі, надійності каналу та енергоефективності.

Найбільш критичними для роботи БСМ є:

- енергоефективність, оскільки більшість вузлів працює від батарей і не має можливості підзарядки [13];
- масштабованість, адже кількість вузлів у мережах може досягати тисяч і навіть десятків тисяч [11];
- самовідновлення та толерантність до відмов — мережа має продовжувати роботу навіть при виході з ладу окремих елементів;
- низька пропускна здатність, зумовлена обмеженими характеристиками радіомодулів та потребою економити енергію;
- низька латентність або її адаптація — важлива для критичних застосувань.

Маршрутизація в БСМ часто базується на енергетичних критеріях: протоколи прагнуть мінімізувати кількість передач або забезпечити рівномірне споживання енергії вузлами (наприклад, LEACH, PEGASIS, TEEN, ECRA) [13].

Завдяки гнучкості розгортання та низькій вартості сенсорних елементів, БСМ стали базовим інструментом для широкого спектра застосувань.

Екологічний моніторинг. Мережі використовуються для моніторингу температури, вологості, забруднення повітря та води, рівня радіації, пожежної небезпеки, якості ґрунту тощо [16]. БСМ дозволяють створювати довгострокові карти змін екосистем.

Сільське господарство (AgriTech). Сенсори контролюють стан ґрунту, рівень вологості, параметри мікроклімату теплиць, поширення шкідників та оптимізують зрошення, що дає змогу значно підвищити врожайність і зменшити витрати ресурсів [16].

Розумні міста. Використовуються для моніторингу шуму, трафіку, освітлення, парковок, енергоспоживання, безпеки та інфраструктурного стану [18].

Промисловий моніторинг (Industry 4.0). БСМ відстежують стан

обладнання, вібрації, температуру двигунів, тиск у трубопроводах, забезпечуючи предиктивне технічне обслуговування [18].

Медицина та охорона здоров'я. Використовуються у системах моніторингу пацієнтів, але потребують підвищеної надійності та безпеки через чутливість даних.

Військові застосування. БСМ використовуються для спостереження за територіями, виявлення руху, ідентифікації об'єктів, забезпечення ситуаційної обізнаності, охорони периметра.

Загалом сенсорні мережі стали основою багатьох рішень у сфері Інтернету речей (IoT), де потрібний автономний збір та передача інформації без участі людини [12].

## 1.2 Проблеми збору даних у традиційних бездротових сенсорних мережах

Незважаючи на широке застосування бездротових сенсорних мереж, процес збору даних у традиційних БСМ стикається з низкою суттєвих технічних та експлуатаційних проблем. Однією з ключових є обмежений енергетичний ресурс сенсорних вузлів, більшість з яких працює від малогабаритних батарей без можливості їхньої заміни або підзарядки після розгортання [5]. Через це вузли повинні працювати у високоефективних енергозберігаючих режимах, що обмежує частоту передачі даних, потужність радіосигналу та обчислювальні можливості. В умовах багатохопкової маршрутизації вузли, розташовані ближче до центрального приймача, зазвичай витрачають більше енергії, оскільки обробляють і ретранслюють значні обсяги трафіку від інших вузлів, що призводить до їхнього передчасного виходу з ладу та формування «енергетичних дір» у мережі [6].

Ще однією проблемою є нестабільність якості радіоканалу, що спричинена впливом рельєфу місцевості, перешкод, погодних умов, багатопроменевого поширення сигналу та інтерференції від інших бездротових пристроїв [7]. У

складних середовищах рівень втрати пакетів може суттєво збільшуватися, що погіршує достовірність переданих даних та вимагає повторної передачі, яка, у свою чергу, збільшує енерговитрати мережі.

Крім того, традиційні БСМ часто страждають від обмеженої пропускної здатності, оскільки використовують низькошвидкісні радіопротоколи, оптимізовані для мінімізації енергоспоживання [11]. Це створює труднощі при роботі у сценаріях, де потрібне отримання великих обсягів даних або високої частоти оновлення інформації, наприклад у системах моніторингу рухомих об'єктів чи технологічних процесів у режимі реального часу.

Ще одним викликом є масштабованість та балансування навантаження. Із збільшенням кількості вузлів мережа стає все більш складною, збільшується конкуренція за доступ до каналу, підвищується рівень колізій, а маршрути стають довшими та менш стабільними [12]. Вузли можуть ставати перевантаженими або надмірно використовуваними, що спричиняє нерівномірне споживання енергії та зниження загальної продуктивності.

Для мереж, що працюють у важкодоступних або небезпечних зонах, суттєвими є також проблеми фізичного доступу та обслуговування. Неможливість заміни батарей, ремонту або переналаштування вузлів після їхнього розгортання ставить високі вимоги до автономності мережі та її здатності самостійно адаптуватися до змін [13].

Узагальнюючи, традиційні методи збору даних у БСМ мають низку обмежень, що суттєво впливають на їхню ефективність і тривалість роботи. Ці проблеми стимулюють пошук нових рішень, серед яких одним з найперспективніших є використання безпілотних літальних апаратів як мобільних колекторів даних, що може значно зменшити енергетичне навантаження на мережу, покращити якість зв'язку та підвищити адаптивність системи у динамічних умовах.

### 1.3 Застосування БПЛА у системах моніторингу та збирання інформації

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у системах моніторингу та збору інформації стало одним із ключових напрямів розвитку сучасних інтелектуальних систем спостереження, контролю та управління. Завдяки своїм унікальним характеристикам — мобільності, гнучкості, автономності та можливості швидкого доступу до важкодоступних територій — БПЛА сьогодні широко застосовуються у цивільних, промислових, наукових і військових галузях [8]. Їхнє поєднання з бездротовими сенсорними мережами (БСМ) створює новий клас високоефективних систем збору даних, що поєднують розподіленість сенсорних вузлів з мобільністю повітряних платформ.

Традиційні методи моніторингу, які включають фіксовані сенсорні мережі, супутникові системи або наземні транспортні засоби, мають низку обмежень: тривалий час розгортання, значні фінансові витрати, обмежену доступність до певних територій та залежність від інфраструктури [8]. БПЛА, натомість, забезпечують швидке покриття великих площ, можливість побудови довільних траєкторій руху, оперативний доступ до зони інтересу та незалежність від наземних умов.

Окрім того, БПЛА дозволяють виконувати моніторинг у режимі реального часу, передавати дані на наземні станції або обробляти їх безпосередньо на борту за допомогою вбудованих обчислювальних модулів [11]. Це робить їх незамінними у випадках, коли важливо швидко реагувати на зміни або події, такі як поширення пожежі, рух транспортних засобів, вимірювання рівня забруднення чи контроль технологічних процесів.

У контексті моніторингу БПЛА зазвичай класифікують за типом конструкції — на мультикоптери, літаки фіксованого крила та гібридні моделі.

Мультикоптери відзначаються високою маневровістю, можливістю зависати в повітрі та виконувати точкові вимірювання. Вони широко застосовуються для локальних інспекцій, картографування невеликих територій, екологічного моніторингу та міських задач.

БПЛА фіксованого крила забезпечують триваліший час польоту та більшу дальність покриття, що робить їх доцільними для спостереження за великими площами — сільськогосподарськими угіддями, лісовими масивами, промисловими зонами.

Гібридні системи поєднують переваги двох попередніх класів, забезпечуючи вертикальний зліт і посадку, але зберігаючи аеродинамічну ефективність у горизонтальному польоті.

На борту БПЛА встановлюються різноманітні сенсори: оптичні камери, тепловізори, LiDAR, газоаналізатори, мультиспектральні та гіперспектральні модулі, радіолокаційні установки [13]. Такий широкий спектр обладнання дозволяє використовувати БПЛА у складних сценаріях збору даних, де потрібна висока точність, деталізація або узагальнення інформації.

#### 1.4 Інтеграція БПЛА з бездротовими сенсорними мережами

Одним із найперспективніших напрямів сучасних досліджень є інтеграція БПЛА з бездротовими сенсорними мережами, у яких дрон виступає в ролі мобільного колектора даних [9]. На відміну від статичних кінцевих вузлів, БПЛА може переміщуватися між групами сенсорів, збирати інформацію з мінімальними енергетичними витратами з боку вузлів та передавати зібрані дані до центрального пункту.

Такий підхід дає змогу:

- зменшити енергоспоживання БСМ за рахунок скорочення кількості передач між вузлами [11];
- усунути проблему «вузлів-гарячих точок», які зазвичай перевантажуються пакетами в багатохопових мережах;
- забезпечити доступ до віддалених або пошкоджених сегментів мережі;
- адаптувати частоту збору даних залежно від конкретних задач.

Інтелектуальні алгоритми планування траєкторії БПЛА враховують енергетичний запас сенсорних вузлів, рівень сигналу, вимоги до затримки, пріоритетність окремих вузлів тощо [12]. Це дозволяє оптимізувати переліт таким чином, щоб мінімізувати час збору інформації або максимізувати тривалість роботи мережі.

### 1.5 Застосування БПЛА в екологічному, промисловому та кризовому моніторингу

Екологічний моніторинг є однією з ключових сфер застосування безпілотних літальних апаратів. БПЛА використовуються для контролю стану лісів, оцінки загроз лісових пожеж, моніторингу якості води та повітря, виявлення незаконних вирубок або забруднень [18]. Завдяки можливості оснащення мультиспектральними камерами дрони застосовуються для аналізу стану рослинності, картографування біологічного різноманіття та прогнозування екологічних змін.

У промисловості БПЛА виконують інспекції трубопроводів, електромереж, нафтових платформ, транспортної інфраструктури, вентиляційних шахт та інших об'єктів, які можуть бути небезпечними або важкодоступними для людини [19]. Застосування дронів у таких умовах підвищує безпеку персоналу, скорочує час обстежень та зменшує витрати. У поєднанні з БСМ дрони можуть збирати інформацію про вібрації, температури, рівень напруги та інші параметри, що дозволяє виконувати предиктивне технічне обслуговування.

В умовах надзвичайних ситуацій, таких як землетруси, повені, хімічні аварії чи бойові дії, БПЛА є незамінним засобом оперативного моніторингу. Вони можуть швидко створювати карти пошкоджень, виявляти потерпілих, оцінювати рівень забруднення та передавати інформацію в режимі реального часу. У зонах, де сенсорні мережі були пошкоджені чи знищені, БПЛА здатні

виконувати роль тимчасових ретрансляторів або джерел живлення для сенсорних вузлів.

У сільському господарстві безпілотні літальні апарати відіграють важливу роль у концепції «точного землеробства». Вони використовуються для аналізу стану посівів, оцінки рівня зволоження ґрунту, виявлення хвороб рослин та контролю роботи зрошувальних систем. Мультиспектральні сенсори дозволяють визначати вміст хлорофілу, індекс NDVI та інші параметри, які важко отримати за допомогою наземних засобів. У поєднанні з БСМ, що контролюють температуру, вологість та хімічні показники ґрунту, БПЛА формують комплексну систему моніторингу агроєкосистем, що дозволяє оптимізувати витрати води, добрив та енергії.

Попри широке застосування, інтеграція БПЛА у системи моніторингу стикається з низкою викликів: обмежений час польоту, необхідність точного планування траєкторій, регуляторні обмеження, потреба в автономних системах уникнення перешкод, питання кібербезпеки та захисту зібраних даних [19]. Проте активний розвиток енергоефективних двигунів, легких батарей, комп'ютерного зору та штучного інтелекту поступово усуває ці бар'єри. Очікується, що в найближчі роки БПЛА стануть ключовим компонентом багатьох систем автономного моніторингу, зокрема у поєднанні з БСМ, IoT-платформами та хмарними сервісами [17].

## 2. ЗБІР ДАНИХ РОЗПОДІЛЕНОЇ SDWSN НА ОСНОВІ БПЛА

### 2.1 Організація розподіленої системи SDWSN

Традиційно, збір даних за допомогою БПЛА базується або на прямому з'єднанні з окремими вузлами, або на непрямому зв'язку з вузлами, що представляють групу (їх називають головними вузлами кластера). Хоча групування в такому формуванні забезпечує ефективнішу передачу даних, воно все ще обмежує шлях БПЛА для збору даних обмеженими варіантами після структурування фактичної топології кожної групи. Головне питання полягає в тому, чи можемо ми послабити параметри маршруту БПЛА, дозволивши вибрати головні вузли кластера відповідно до шляху збору даних.

Релаксація траєкторії польоту дозволяє БПЛА знизити витрати енергії в точках повороту, як тільки БПЛА потрапляє в межах гострих кромек. Це сприяє мінімальним коливанням швидкості та прискорення, необхідним у точках повороту, зменшуючи споживання енергії двигуном БПЛА під час польоту [12]. Цей метод також дозволяє динамічно перевизначати групові топології за допомогою програмного забезпечення. У цьому випадку групи керування (СН) перевизначаються програмно відповідно до вимог маршруту польоту.

Термін «нечіткий маршрут подорожі» використовується в цій роботі для опису можливості програмного перевизначення організації мережі для узгодження з оптимальним маршрутом польоту БПЛА. Тут необхідно уточнити, що саме мається на увазі під нечітким маршрутом БПЛА. Концепція нечіткого маршруту подорожі визначається як діапазон маршруту польоту БПЛА, який дозволяє вибрати маршрут польоту БПЛА з ширшого діапазону альтернатив, а не фіксувати його на одному визначеному шляху. Вибір динамічних параметрів польоту БПЛА, таких як форма маршруту, швидкість польоту та варіації прискорення, може забезпечити більше варіантів і бути розробленим для максимізації ефективності подорожі, одночасно зменшуючи втрати даних. Така організація дозволяє динамічно коригувати маршрут БПЛА відповідно до

оновленої топології наземної мережі. Основний задача цього дослідження полягає у використанні концепції програмно-визначеної оркестрації мережі, що застосовується до наземної мережі, та дослідженні її впливу на стійкість процесу збору даних, оцінці її впливу на рух БПЛА та енергоефективність наземної мережі, а також спільному аналізу споживання енергії на шляху БПЛА та витрат енергії наземною мережею.

Підхід нечіткого маршруту базується на можливості модифікації заданої функціональності вузла з ролі кінцевого вузла на роль шлюзового або навпаки. Ці вузли відомі як вузли, здатні до шлюзів. Завдяки релаксації шляху БПЛА, що виникає внаслідок більшого нечіткого діапазону, цей метод може підвищити загальну стійкість та ефективність системи. Тут запропонована структура топології спрощує шлях БПЛА, включаючи ефективні та оптимальні проекти маршрутів у нечіткій області маршруту БПЛА та забезпечуючи стійкість для адаптивного вибору шлюзу ближче до шляху БПЛА. Для загального вигляду запропонована модель розглядає випадковий розподіл наземної мережі, враховуючи як щільний, так і розріджений розподіл вузлів у заданій тестовій області. Мета полягає в ідентифікації моделі, враховуючи розподіл та щільність наземної мережі як два ключові фактори (обговорюються в наступному розділі). Згідно з запропонованою моделлю, сусідні вузли, що знаходяться в межах лінії спостереження один від одного, утворюють групу бездротової сенсорної мережі (WSN), яка контролюється одним або кількома наземними представниками, що діють як голова(и) кластера.

Проектування нечіткого слідування за траєкторією зі вставленими гладкими та оптимальними траєкторіями для кожного сценарію розподілу та щільності показано на рисунку 2.1 a–d. Метод неоднорідного планування траєкторії за допомогою кривих Без'є на гострих ребрах є одним із рішень для вирівнювання траєкторії в межах нечіткого маршруту, щоб подолати більші витрати енергії на гострих ребрах (див. рисунок 2.1 a–c). З іншого боку, проект траєкторії БПЛА має змінну швидкість, що призводить до негнучкості в реальному плануванні траєкторії та призводить до зниження енергоефективності

БПЛА. Отже, запропоновано приклад розслабленої траєкторії БПЛА, що вписується в нечіткий маршрут польоту з використанням геометрії кругових дуг/ліній, як показано на рисунку 2.1 d [14]. Це продемонстровано за допомогою двох напівкруглих маршрутів з постійною швидкістю та двох лінійних та рівних траєкторій польоту зі змінними швидкостями. Запропоновані геометричні напівкруглі маршрути забезпечують кращу продуктивність з точки зору енергоефективності, що дозволяє БПЛА рухатися з постійною швидкістю по всіх кривих [14]. Релаксація зміни швидкості покращує споживання енергії БПЛА протягом усього маршруту та одночасно знижує складність траєкторії польоту. Детальне пояснення розроблених методів гладких шляхів обговорюється далі в роботі [14]. У цій статті оптимальний дизайн шляху в нечіткому діапазоні отримано на основі розв'язання запропонованої функції вартості для задачі оптимізації.

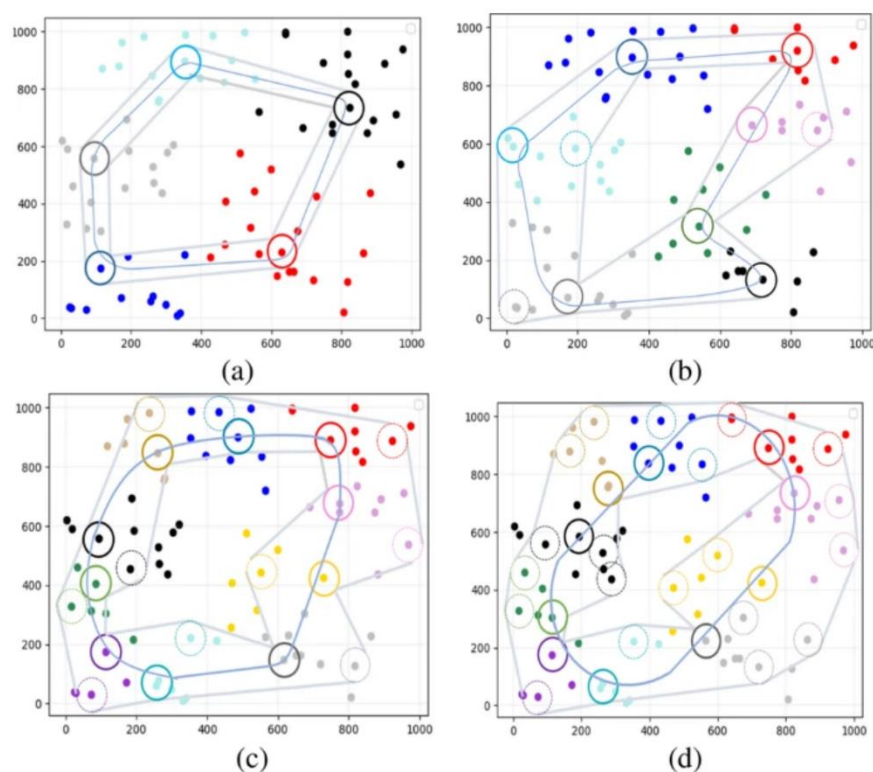


Рисунок 2.1 - Проектування нечіткого маршруту та гладкого шляху з різним розподілом вузлів, що підтримують шлюзи

Згідно з результатами моделювання, використання нечіткого, плавного та оптимального шляху не лише покращує енергоефективність усього маршруту,

але й забезпечує адаптивність до оновленого формування наземної мережі. У цій роботі також зосереджена увага на формуванні програмно-визначеної комунікаційної мережі через наземне та повітряно-земне з'єднання. Запропонована модель сильно залежить від відсотка розподілу та щільності вузлів, що підтримують шлюзи. Як показано на цих рисунках, призначені шлюзи представлені суцільними колами для кожної групи, тоді як решта потенційних шлюзів зображені пунктирними колами в структурі мережі. Коротше кажучи, підхід з нечітким маршрутом польоту надає потенціал для послаблення заданих опцій для польотного маршруту над заданою групою без загрози для рівня обслуговування зв'язку. Залежно від здатності членів групи бездротової мережі (WSN) взяти на себе роль шлюзу, чим більше розподілені члени, що підтримують шлюзи, тим кращий плавний простір польоту.

## 2.2 Система мережевого зв'язку

Архітектура мережевого зв'язку базується на розділенні всієї системи на кілька мережевих компонентів: наземна мережа, дрон, хмарні станції. Ролі «вузол», «маршрутизатор» та «шлюз» – це три основні ролі у формуванні наземної мережі, як показано на рисунку 2.2. Вузол може бути призначений одній або кільком із цих ролей. Термінал дрона також є мобільним транспортним засобом, який збирає дані з землі та надсилає їх у хмару через Інтернет для миттєвої оцінки оркестрації/реоркестрації та цілей віртуалізації.

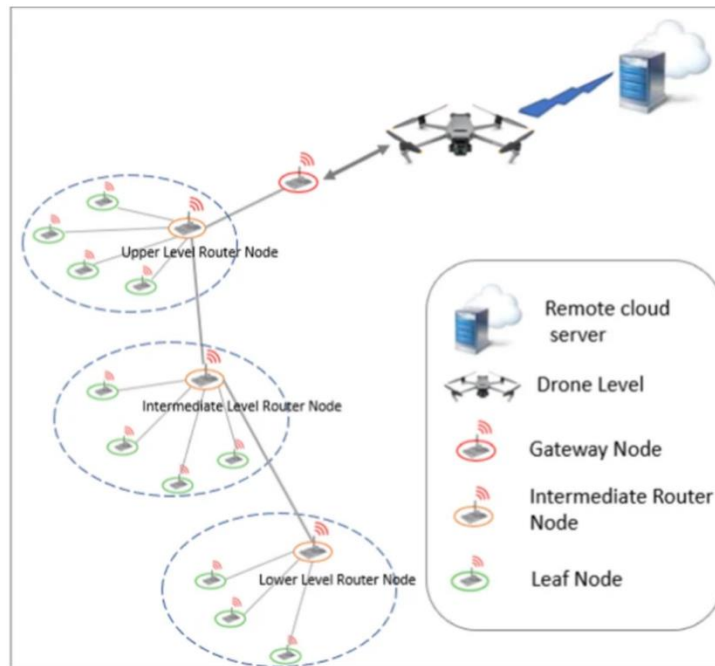


Рисунок 2.2 - Топологічна схема збору даних бездротової сенсорної мережі (WSN)

Головним чином, зв'язок між БПЛА та землею в запропонованій SDWSN базується на наборі повідомлень з інформаційними даними керування/датчиками, які необхідно передати через хмару, щоб або налаштувати мережу на етапі, який називається «фаза топологічного сканування перед оркестрацією», або зібрати дані датчиків на іншому етапі, який називається «фаза збору даних після оркестрації». Запропонована системна модель вимагає ще одного етапу, який називається «фаза оркестрації», для повідомлення наземних мережевих об'єктів про їхні нові ролі через зворотний зв'язок з хмари. Зв'язок між трьома діючими підрозділами, який включає ці три етапи, має на меті:

- Збір даних керування БПЛА на доступних шлюзах та відповідних вузлах, які мають до них доступ, і передача цих даних керування до хмари.
- Аналіз зібраних даних керування на рівні хмари та визначення обраних шлюзів, пов'язаної з ними структури мережі та робочих параметрів.

- Передача результатів аналізу з хмари до наземних мереж у рамках контрольної інформації, що забезпечує оновлену конфігурацію наземних мереж.
- Збір даних наземного зондування на етапі збору даних після оркестрації як наступний етап запуску руху БПЛА в межах розробленого оновленого нечіткого маршруту.

### 2.3 Різні ролі в мережевій системі

Структура комунікаційної мережі базується на визначенні кількох ролей наземної/повітряної мережі. Це включає кінцеві вузли, вузли з можливістю маршрутизації, вузли з можливістю шлюзу, рівень дрона та віддалений хмарний сервер. Кінцеві вузли – це найнижчі функціональні ролі в мережі, попередньо визначені до початку руху БПЛА; кінцеві вузли відповідають за збір даних від підключених датчиків та передачу даних вимірювань і критичної керуючої інформації до маршрутизаторів або шлюзів вищого рівня. Вони не перебувають у безпосередньому контакті з БПЛА під час фаз SDWSN[11]. Кінцеві вузли також можуть бути програмно перевизначені, щоб вони діяли як повнофункціональні вузли маршрутизації або щоб увімкнути або вимкнути певну функцію запиту чи обробки даних.

Вузли з можливістю роботи з маршрутизаторами також можуть бути програмно визначені як повнофункціональні маршрутизатори високого рівня або кінцеві вузли з обмеженою функціональністю через керуючі пакети, отримані через шлюз. Після обрання як маршрутизатори, вони можуть передавати інформацію від інших кінцевих вузлів до маршрутизаторів вищого рівня або активних шлюзів, використовуючи протокол багатострибкового зв'язку. Вважається, що вони не мають прямого зв'язку з БПЛА. Їхні ролі як маршрутизаторів/кінцевих вузлів призначаються БПЛА на етапі оркестрації.

Вузли з функцією шлюзу можуть бути програмно визначені для роботи як шлюзи або перенесені на маршрутизатори нижчого рівня та кінцеві вузли. Залежно від їхніх оновлених програмно визначених ролей та їх розподілу у випадкових позиціях у наземній мережі, вони можуть представляти різноманітні мережеві топології, такі як деревоподібні або зіркові. Вони також визначають нечіткий шлях БПЛА. Їхні ролі були повідомлені дроном під час фази оркестрації. Після вибору як шлюзи для заданої мережі датчиків, вони відповідають за збір даних, що надходять від вузлів нижчого рівня, та миттєве пересилання їх на дрон під час фази збору даних. Просторове розташування у великомасштабному розподілі мережі може включати більше одного вузла, визначеного як шлюз. Наявність кількох шлюзів у великомасштабній мережі сприяє запобіганню швидкому виснаженню енергії вузлів, налаштованих як шлюзи, та підвищує надійність, зменшуючи ризик виходу з ладу одного шлюзу. При цьому гнучкість мережі для обробки будь-яких змін, таких як постійне відновлення у відповідь на розрив, спричинений відмовою мережевих компонентів/шлюзів, може бути досягнута за допомогою резервних/кількох вузлів. Крім того, він може забезпечити ширший діапазон нечітких траєкторій БПЛА, де маршрут динамічно коригується, щоб покращити енергоефективність дрона або балансування споживання енергії наземною мережею.

БПЛА діє як маршрутизатор верхнього рівня між шлюзами та хмарним сервером, надаючи доступ до віддаленого хмарного сервера для передачі даних через потік керуючих даних вище рівня на етапі передоркестрації або потік даних оперативного зондування на етапі збору даних після оркестрації та потік реконфігурації наземних станцій нижче рівня під час фази оркестрації. Хмарна платформа є центральною станцією для обробки реальних даних, що передаються дронами та станціями віртуалізації мережі. Рішення щодо вибору шлюзів та маршрутизаторів також приймаються на хмарних серверах. Після прийняття рішення нечіткий шлях БПЛА разом із обраними шлюзами та маршрутизаторами призначається ідентифікатору кожного вузла на віддаленій хмарній станції. Далі, за допомогою сповіщень, рішення повертаються до

вибраних маршрутизаторів та шлюзів, а також до призначених їм кінцевих вузлів для структурування наземної мережі.

У топологічній схемі (рисунок 2.2) припускаємо, що вузли зі шлюзовими можливостями розподілені таким чином, що один або декілька з них не ізольовані від решти вузлів зі шлюзовими можливостями (у наземній мережі не повинно бути жодного ізольованого вузла зі шлюзовими можливостями).

Коефіцієнт розподілу вузлів  $D$ , сумісних зі шлюзами визначає відсоток популяції вузлів, сумісних зі шлюзами, від загальної популяції вузлів датчиків. Також коефіцієнт вибору шлюзу представляє відсоток популяції вузлів, сумісних зі шлюзами, які були переналаштовані як шлюзи на кожному етапі вибору конфігурації. Коефіцієнт вибору шлюзу для кожного процесу вибору реконфігурації отримується за формулою:

$$\xi_i = \frac{n_i}{m} \quad (2.1)$$

де  $n_i$  - кількість шлюзів, обраних в  $i$ -му процесі вибору реконфігурації,  $m$  - кількість попередньо визначених вузлів, що підтримують шлюзи

Іншим фактором є коефіцієнт розсіювання, який відображає аспект розсіювання обраних шлюзових вузлів у наземній мережі після кожного процесу вибору реконфігурації. Він отримується з:

$$\sigma_{gc_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (q_0^i - \mu)^2}{N}} \quad (2.2)$$

де  $\sigma_{gc_i}$  коефіцієнт розкиду після процесу вибору,  $q_0^i$  - координати обраних шлюзових вузлів,  $\mu$  - середні координати обраних шлюзових вузлів,  $N$  - кількість шлюзових вузлів.

Ці три фактори є основними параметрами у визначенні розподілу та щільності вузлів, що підтримують роботу шлюзів, та обраних вузлів шлюзів серед загальної кількості наземних мережевих об'єктів.

Як показано на рисунку 2.1 a–d, продемонстровано ефект збільшення відсотка вузлів, здатних до роботи зі шлюзом, та коефіцієнта розкиду при збереженні постійної величини коефіцієнта вибору шлюзу на нечіткій області шляху, а отже, і на маршруті польоту БПЛА. Як тільки відсоток вузлів, здатних до роботи зі шлюзом, та коефіцієнт розкиду обмежуються заданим порогом  $D_{gc}$  та  $\sigma_{gc}$ , форма шляху БПЛА втрачає свою плавність. З іншого боку, це можна покращити до більш розслабленої форми з менш гострими кінцями, використовуючи концепцію покращення кривої Без'є.

І навпаки, як тільки відсоток вузлів, що підтримують роботу зі шлюзами, та коефіцієнт розкиду перевищують заданий поріг, нечітка область БПЛА розширюється, що забезпечує більшу гнучкість у визначенні шляху БПЛА, і, отже, шлях БПЛА наближається до гладкого/оптимального шляху з мінімальними гострими кінцями (див. рисунок. 2.1d ). Отже, запропонована організація топології забезпечує плавність маршруту БПЛА, мінімізуючи коливання швидкості, прискорення та довжини шляху. Цей підхід також забезпечує гнучкість вибору шлюзів ближче до проектування маршруту БПЛА.

#### 2.4 Модель споживання енергії для комунікаційної мережі

Запропонована економічно ефективна енергетична модель для оцінки вартості зв'язку як на етапі топологічного сканування SDWSN до оркестрації, так і на етапі збору технологічних даних після оркестрації представлена нижче:

$$Cost_{total} = Cost_{Ground-network} + Cost_{air-to-Ground} \quad (2.3)$$

де загальна вартість зв'язку дорівнює сукупності витрат на зв'язок як наземних датчиків, так і точок доступу, що забезпечують зв'язок з БПЛА. Споживання енергії кожним мережевим компонентом для забезпечення наземного мережевого зв'язку дорівнює:

$$P_T = P_{Tx} + P_{Rx} + P_{LPM} + P_{Idle} \quad (2.4)$$

Це означає, що середнє споживання енергії кожним вузлом є сумою середнього споживання енергії вузлом у чотирьох режимах: режим очікування, режим низького енергоспоживання (LPM), режими прийому та передачі. Режим очікування ( $P_{Idle}$ ) активується щоразу, коли вузол прослуховує (інтервал часу, протягом якого процесор неактивний, перш ніж радіопередавач або приймач активується). Режим LPM ( $P_{LPM}$ ) активується, коли сенсорний вузол переходить у режим низького енергоспоживання. Режим Rx ( $P_{Rx}$ ) активується в режимі радіоприйому, і, нарешті, режим Tx ( $P_{Tx}$ ) активується в режимі передачі.

Вузли датчиків працюють або в активному режимі, або в режимі сну. Співвідношення часу, проведеного в активному режимі, до загального періоду даних визначається як робочий цикл. Загалом, датчики споживають енергію переважно на отримання та передачу даних, а також на прослуховування в режимі очікування, коли вони перебувають в активному режимі.

Запропонована енергетична модель використовує відстежувач енергії Contiki для вимірювання часових інтервалів, які кожен вузол проводить у цих чотирьох режимах [21]. Отже, загальне споживання енергії на вузол можна розрахувати, враховуючи еквівалентну спожиту енергію для цих інтервалів, наступним чином:

$$Cost = \sum_{i=1}^4 P_i \times T_i \quad (2.5)$$

де  $P_i$  представляє значення споживаної потужності в кожному режимі живлення,  $T_i$  – час, витрачений на певний  $i$ -й режим. Аналіз розрахунку потужності було проведено на основі інформації, отриманої з технічного опису CC2538, для значень поточного споживання, коли модуль знаходиться в активних режимах прийому, передачі, очікування та низького енергоспоживання.

Для забезпечення зв'язку "повітря-земля" між БПЛА та вузлами шлюзу використовуємо радіомодель [23] для моделювання споживання енергії на передачу та отримання даних для  $b$  біт, як показано нижче:

$$E_t = \begin{cases} bE_{elec} + b\epsilon_{fs}d^2 & d \leq d_0 \\ bE_{elec} + b\epsilon_{amp}d^4 & d > d_0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$E_r = bE_{elec} \quad (2.7)$$

$E_{elec}$  – означає втрати в передавальному каналі, а  $d_0$  – порогова відстань.  $\epsilon_{fs}$  - це енергія для посилення потужності у моделі каналу вільного простору та моделі каналу з багатопроменевим згасанням відповідно. Кількість переданих/отриманих бітів для кожного вузла позначається як  $b$ . З ( 2.6 ) та ( 2.7 ) зрозуміло , що споживана енергія для передавача  $E_t$  та приймача  $E_r$  сильно залежить від отриманих/розповсюджених бітів як  $b$  та миттєвої відстані між передавачем і приймачем як  $d$ . Така ж енергетична модель реалізована в CupCarbon для розрахунку споживання енергії для зв'язку "повітря-земля". Ми припускаємо, що відстань передачі ( $d$ ) під час зв'язку між БПЛА та кожним шлюзом менша за порогову відстань ( $d_0$ ) , і відповідно застосовується модель каналу вільного простору. Загальна вартість зв'язку як на етапах топологічного сканування SDWSN до оркестрації, так і на етапах збору даних після оркестрації аналізується на основі різних коефіцієнтів розподілу та щільності наземної мережі.

Якість зв'язку між БПЛА та його сусідніми шлюзами визначається за допомогою інформації про індикатор сили отриманого сигналу (RSSI) отриманих пакетів.

Коефіцієнт потужності на вузол є ще одним параметром у запропонованому визначенні моделі придатності, який виражається як:  $H_i$

$$H_i = 1 - \left( \frac{M_i}{Q_{max i}} \right) \quad (2.8)$$

де — це поточна кількість підключених вузлів до шлюзового вузла  $th$ , а — це максимальна ємність шлюзового вузла  $th$ . Зауважте, що як тільки кількість підключених вузлів до шлюзу дорівнює визначеній максимальній ємності, коефіцієнт ємності дорівнює 0. Це означає, що шлюз підключений до маршрутизаторів та кінцевих вузлів своїх сусідів на повну ємність і споживає більше енергії, ніж інші шлюзи. Це означає, що цей шлюз повинен мати меншу перевагу над іншими шлюзами з вищим коефіцієнтом ємності.

## 2.5 Аналітичне формулювання задачі оптимізації траєкторії БПЛА

Після кількох сценаріїв, що передбачаються в нечіткому діапазоні БПЛА, вихідна продуктивність запропонованого підходу включає відсоток обслуговуваних сенсорних вузлів, споживання енергії наземної мережі та середнє споживання енергії БПЛА. Очевидно, що існує компроміс між споживанням енергії двигуном БПЛА та вартістю енергії наземної мережі. Хоча евристичний плавний дизайн шляху БПЛА [14] може запропонувати енергоефективний шлях з точки зору вартості БПЛА, він передбачає енергоефективну модель збору даних з точки зору наземних сенсорних мереж. Дизайн шляху БПЛА з кривою Без'є, хоча й призводить до зниження споживання енергії БПЛА на місію та знижує відсоток обслуговуваних сенсорних вузлів, він

корисний для формування наземної мережі з точки зору енергоефективності. Отже, необхідно визначити задачу оптимізації для вирішення оптимального рішення, враховуючи спільну мінімізацію споживання енергії двигуном БПЛА та споживання енергії наземними сенсорними мережами, одночасно максимізуючи доставку пакетів до БПЛА.

З цією метою, щоб покращити доставку пакетів у зв'язку "повітря-земля", необхідно розробити статистичну модель для моделювання пропускної здатності зв'язку між БПЛА та сітковими мережами (SN) з урахуванням зв'язку LoS. Модель зв'язку "повітря-земля" для епізодичного блокування каналу зв'язку через канали NLoS у цій роботі не передбачається. Отже, загальна кількість інформаційних бітів, переданих БПЛА протягом часу є функцією траєкторії БПЛА, вираженою як [22]:

$$\bar{R}(q(t))_{air-to-Ground} = \int_0^T B \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0}{H^2 + \|q(t)\|^2} \right) dt \quad (2.9)$$

де  $B$  пропускна здатність каналу,  $\gamma_0$ — опорне відношення сигнал/шум (SNR) при  $d_0=1m$ .  $H$  висота польоту БПЛА над наземними секвенсуючими антенами. Також, споживання енергії БПЛА з фіксованим крилом, враховуючи змінну швидкість  $v(t)$  та вектори прискорення виражається  $a(t)$  у формулі

$$\begin{aligned} \bar{E}(q(t)) = & \int_0^T [c_1 v(t)^3 + \frac{c_2}{v(t)} \left( 1 + \frac{a(t)^2 - \frac{(a^T(t)v(t))^2}{v(t)^2}}{g^2} \right)] dt \\ & + \frac{1}{2} m (v(t)^2 - v(0)^2) \end{aligned} \quad (2.10)$$

де  $c_1$  та  $c_2$  – два параметри, пов'язані з вагою літака, крилом, щільністю повітря тощо, – гравітаційне прискорення з номінальним значенням  $9.8m/c^2$ ,  $m$  – маса БПЛА, включаючи все його корисне навантаження. Швидкість вітру вважається нульовою

Для визначення задачі оптимізації апроксимації необхідно задати функцію вартості з кількома параметрами як:

$$\underset{q(t)}{\text{Minimise}} \quad \frac{\overline{E}(q(t))_{UAV-propulsion} + Cost_{Total}}{\overline{R}(q(t))_{air-to-Ground}} \quad \text{s.t. List of Constraints} \quad (2.11)$$

де  $q(t)$  це конструкція траєкторії БПЛА.  $\overline{E}(q(t))_{UAV-propulsion}$  це споживання потужності рушійної системи БПЛА,  $\overline{R}(q(t))_{air-to-Ground}$  це пропускна здатність зв'язку. Згідно з нашими припущеннями,  $(Cost_{Ground-network})$  в межах (2.3) є статичною та не залежить від місця розташування БПЛА, тоді як  $(Cost_{air-to-Ground})$  сильно залежить від відстані між БПЛА та серійними модулями (SN) і, як наслідок, від місця розташування БПЛА на основі (2.6). Отже, вплив споживання енергії наземними сенсорними модулями (SN) під час зв'язку один з одним не враховується у формулюванні даної задачі оптимізації, враховуючи лише споживання енергії для зв'язку БПЛА з землею.

Визначення обмежень для задачі оптимізації залежить від визначення наближення для запропонованого сценарію. Результатом задачі оптимізації, ймовірно, має бути оптимальний та енергоефективний проект траєкторії БПЛА, який адаптується до оновлених наземних мережевих формацій, підтримуючи вимогу максимальної пропускної здатності зв'язку та зменшуючи високі значення вартості наземної енергії.

### 3. ТЕСТУВАННЯ РОБОТИ АЛГОРИТМУ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

Для оцінки та тестування запропонованої моделі застосовується послідовний багатоінструментальний процес моделювання. Як наведено на рисунку 3, кожен етап моделювання, що виконується в окремому програмному інструменті, включає серію обчислень. Ці обчислення можуть активуватися як внутрішніми компонентами цього ж інструменту, так і вихідними параметрами, отриманими з іншого інструменту моделювання. У цьому дослідженні для аналізу продуктивності задіяно чотири ключові програмні засоби: MATLAB, Contiki-Cooja, CupCarbon та Mission Planner. Наприклад, результати, згенеровані в MATLAB, можуть слугувати вхідними даними для Cooja, CupCarbon та Mission Planner. Така інтеграція сприяє ефективній оркестрації мережі та спрощує проектування оптимального маршруту. Кінцеві результати програмування наземної мережі та проектування маршруту БПЛА зосереджені на поліпшенні ключових показників, включаючи споживання енергії наземними сенсорними вузлами, затримку зв'язку, загальні втрати пакетів та витрати енергії БПЛА під час проходження плавного шляху. Моделювання кожного програмного модуля структуровано як послідовність кількох етапів.

#### 3.1 Розроблення нечіткого дизайну шляхів

Програмне забезпечення для моделювання, що використовується для проектування траєкторії БПЛА, - це MATLAB, в якому визначено нечіткий маршрут БПЛА, ненапружений шлях БПЛА та часове вікно зв'язку "повітря-земля" для просторово розподілених сенсорних вузлів [14]. Концепція нечіткого шляху БПЛА спочатку реалізована в MATLAB для розуміння та дослідження впливу параметрів, що залежать від збору даних, на запропоновану модель. MATLAB також генерує візуальні виходи, які можна передати в SITL Mission

Planner для перевірки запропонованих траєкторій. Характеристики, включаючи довжину траєкторії, час місії, миттєву швидкість та прискорення БПЛА, а також енергоефективність БПЛА, оцінюються в MATLAB. У MATLAB перший модуль моделювання (рисунок 3.1) працює через просторовий розподіл наземних сенсорних вузлів, враховуючи два задані варіанти: розподіл вузлів, що мають можливість встановлення шлюзів, та їх коефіцієнт розкиду щільності. Виходячи цього модуля можна використовувати для аналізу наземного мережевого зв'язку в Contiki-Cooja, оскільки розташування розподілених сенсорних вузлів передаються одне за одним з цього модуля MATLAB до мережевого симулятора Cooja. Потім, у рамках другого компонента моделювання тестового стенду в MATLAB, проектується нечіткий маршрут БПЛА та ненапружена траєкторія польоту БПЛА. Після цього, як частина третього процесу, ескізується вікно зв'язку, що забезпечує взаємодію між БПЛА та обраними шлюзами. Вихідні дані цих двох модулів (проектування плавного шляху БПЛА та вікна зв'язку) можуть підтримувати моделювання зв'язку "повітря-земля" в CupCarbon. Проектування плавного шляху БПЛА може бути перевірено в Mission Planner на основі візуалізації реальних сценаріїв. Нарешті, оцінка продуктивності БПЛА, головним чином на основі витрат енергії БПЛА, довжини шляху та швидкості БПЛА для запропонованого плавного шляху.

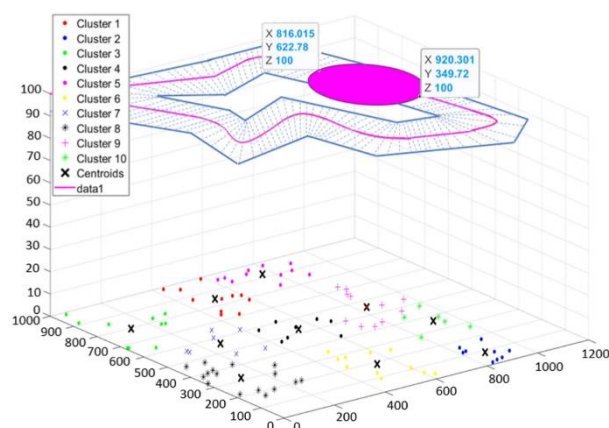


Рисунок 3.1 - Розмита дальність польоту БПЛА та плавне проектування траєкторії польоту

Згідно з рисунком 3.1, різні сценарії розгортання сенсорних мереж

моделюються в MATLAB на основі заданих щільностей та розподілів сенсорних вузлів, а потім нечіткий маршрут вирівнюється на основі попередньо визначених розташувань вузлів, сумісних зі шлюзом, та вузлів, сумісних зі шлюзом. Оскільки запропоноване вікно часу зв'язку відображається на ненапруженому шляху БПЛА в межах нечіткого маршруту (рожеве коло). Нечіткий маршрут ідентифікується (заштрихована область на рисунок 3.1) з урахуванням середнього відсотка розподілу вузлів, сумісних зі шлюзом, та коефіцієнта розкиду, що дорівнює 20% та знаходиться між (700 та 850) відповідно. Оптимальний шлях також представлений на цьому рисунку як рожевий маршрут польоту БПЛА в межах нечіткого заштрихованого діапазону. Вікно зв'язку визначається як час, коли БПЛА знаходиться в межах точок входу та вильоту, розрахований на основі діапазону швидкостей БПЛА. Зі збільшенням середньої швидкості БПЛА, середній час зв'язку знижується, що призводить до погіршення продуктивності мережі.

### 3.2 Моделювання наземної мережі на основі стратегії SDWSN

Як обговорювалося в попередньому розділі, модель мережевого зв'язку в SDWSN поділяється на три основні фази: фаза топологічного сканування перед оркестрацією за допомогою повідомлень керуючої інформації, фаза оркестрації за допомогою повідомлень сповіщень та фаза збору даних після оркестрації за допомогою повідомлень інформаційних даних зондування. Спочатку проводиться тест для мережі з кількома функціональними можливостями (вузол, маршрутизатор та шлюз), в якій режим топологічної структури може бути динамічно переналаштований на основі одно- та багатострибкових мережевих структур. Наземна мережа генерується в Contiki-Cooja, показаному на рисунку 3.2, з усіма вузлами, здатними до шлюзів, залученими до моделі збору даних (це представлено як час, що передує топологічній оркестрації мережі). У цій структурі мережі наземна мережа складається з зіркових мережевих структур до

фази оркестрації. Проектування шляху БПЛА на цьому етапі отримується в результаті вирішення задачі оптимізації для цієї заданої мережевої структури. Після фази оркестрації та передачі керуючих даних дрону, для кожної групи обираються найбільш підходящі шлюзи на основі обчислення моделі придатності, і формуються різні мережеві архітектури, такі як групи передачі даних з одним/багатьма переходами. Цю фазу можна представити як фазу збору даних. Потік даних зондування вгору відбувається під час цієї фази, і БПЛА проходить через кожен обраний шлюз для збору накопичених даних. Шлях БПЛА на цій фазі розглядається як запропонований оптимальний шлях для вирішення задачі оптимізації.

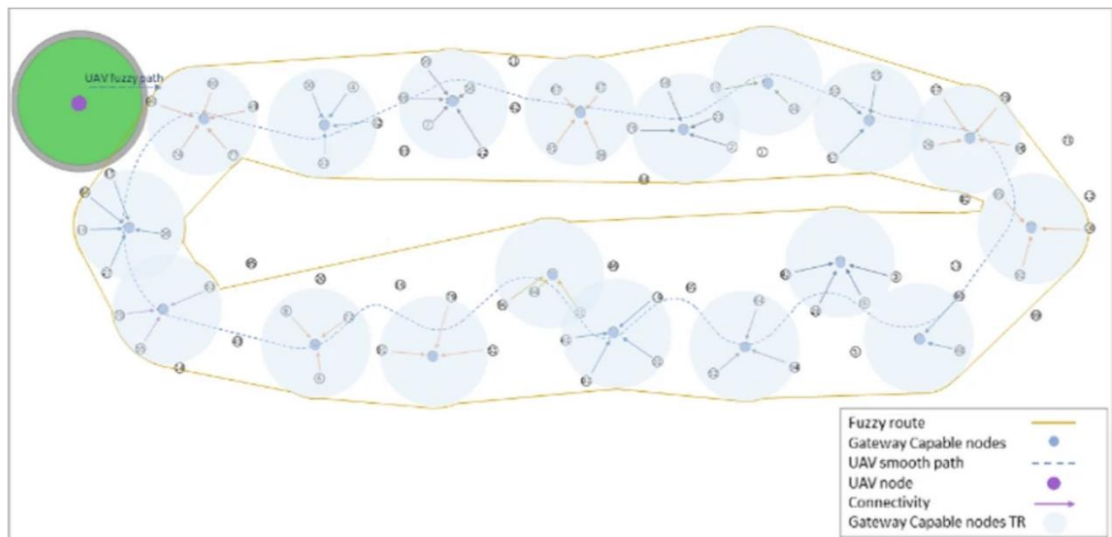


Рисунок 3.2 - Розподіл мережевих компонентів на етапі попередньої оркестрації сканування БПЛА

Метою моделювання є оцінка залишкової енергії, доставки пакетів та затримки зв'язку як під час фази сканування до оркестрації, так і під час фази збору даних після оркестрації. Тестовий стенд розроблено для наземної мережі з різними коефіцієнтами розкиду щільності зі збільшенням швидкості передачі повідомлень від 1 повідомлення за секунду до повідомлень за секунду. Дальність передачі наземної мережі для всіх компонентів наземної мережі встановлена на метрів. Час моделювання встановлено на для передачі даних, а розроблені кадри пакетів для фаз сканування та збору даних передбачаються на основі конструкцій

кадрів пакетів, запропонованих у [15]. Параметри моделювання наведено на рисунку 3.3.

Parameter	Value
Bit rate (bit/sec)	320
Packet Size (Byte)	512
Altitude of UAV (m)	100
Time step size, $\delta$	0.5
Transmitting circuit loss or $E_{elec}$	0.05 $\mu$ J
Free space power amplification $\epsilon_{fs}$	0.002 J
Air-to-Ground transmission range threshold ( $d_0$ )	550 m
Number of Ground Network entities	100
Distribution of Gateway-Capable nodes $D$	20%
Gateway election factor $\xi$ for scanning phase	1
Gateway election factor $\xi$ for data gathering phase	2/3
Ground Network Transmission Range	50 m
Average UAV Speed for both phases	20 m/s
Mission Completion time	1580 s
Transmitted Message rates	1-100 msg/s
Cloud Processing Time for fitness computation $T_{Process(Fitness)}$	200-250 ms
C1	$9.26 \times 10^{-4}$
C2	2250

Рисунок 3.3 - Параметри моделювання моделі

Наземна мережа структурована в Contiki-Cooja з урахуванням різних сценаріїв формування мережі залежно від вибору шлюзових вузлів з попередньо визначеного процесу вузлів, що підтримують шлюзи. Тут, як показано на рисунку 3.2 та рисунку 3.4, передбачається використання двох різних мережевих топологій для формування наземної мережі до та після оркестрації, щоб спостерігати вплив оркестрації мережі на форму шляху БПЛА, споживання енергії наземними SN, затримку зв'язку та відсоток обслуговуваних SN на землі. Обидва архітектурні проекти мають дві фази повідомлень про комунікаційні транзакції, а саме фазу сповіщення про оркестрацію/реоркестрацію потоку даних та фазу сканування або збору даних. Під час фази сповіщення про оркестрацію/реоркестрацію потоку даних, оновлена функціональність кожного вузла, що виникає в результаті рішень моделі придатності, повертається до обраних маршрутизаторів та шлюзів, а також до їхніх зазначених кінцевих вузлів через повідомлення сповіщень для оркестрації/реоркестрації наземної мережі. На етапі сканування потоку даних пакетні кадри передаються до потенційних

шлюзів, а потім завантажуються на БПЛА для забезпечення вхідних даних для моделі придатності з метою перевизначення функціональності потенційних вузлів, тоді як на етапі збору даних пакетні кадри зондування завантажуються на БПЛА.

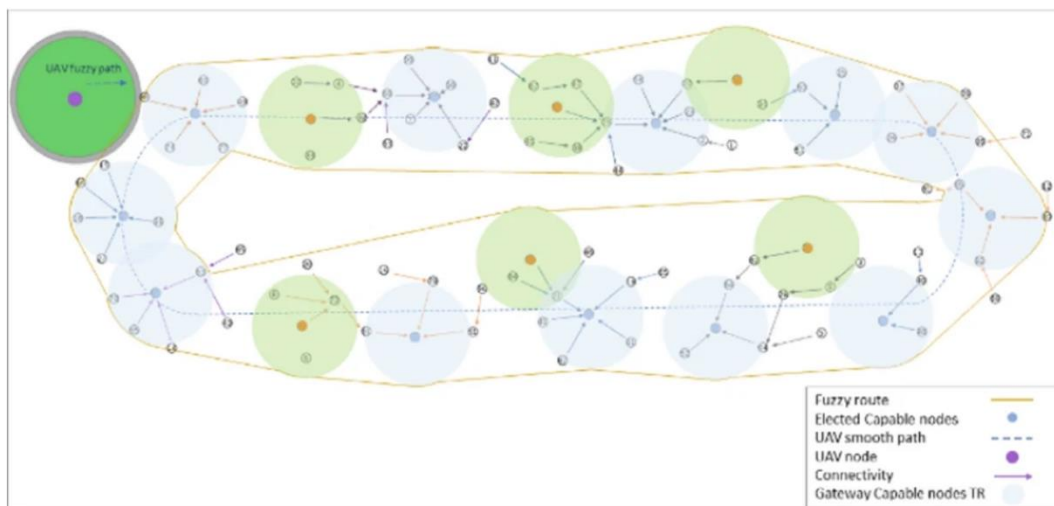


Рисунок 3.4 - Розподіл мережевих компонентів у мережевому симуляторі Contiki-Cooja для фази збору даних після оркестрації

У процесі передоркестрації сканування, як показано на рисунку 3.2, усі вузли з підтримкою шлюзів залучені до моделі збору даних з коефіцієнтом вибору шлюзу = 1, що створює структуру мережі «зірка». Рисунок 3.5 зображує потік даних між наземними компонентами мережі для вибіркової групи мережі в рамках цієї архітектури. Тоді як, виходячи з рисунку 3.4, лише певний відсоток вузлів з підтримкою шлюзів обираються як шлюзи та залучені до моделі збору даних. Отже, для передачі даних від кінцевих вузлів до обраних шлюзів генерується багатострибковий зв'язок. Потік даних між наземними компонентами мережі для вибіркової групи мережі в цій архітектурі мережі представлений рисунку. Проекти шляхів БПЛА як для фаз передоркестрації, так і післяоркестрації сканування побудовані на основі оптимальних шляхів, що дозволяють проходити через обрані шлюзи. Для кожної структури мережі оптимальний релаксований шлях отримується на основі запропонованої функції вартості проходження БПЛА через обрані шлюзи для збору даних. Результати

моделювання, включаючи значення отриманих пакетів на шлюз, затримку зв'язку та споживання енергії на землі, записуються в Contiki-Cooja для кожного сценарію.

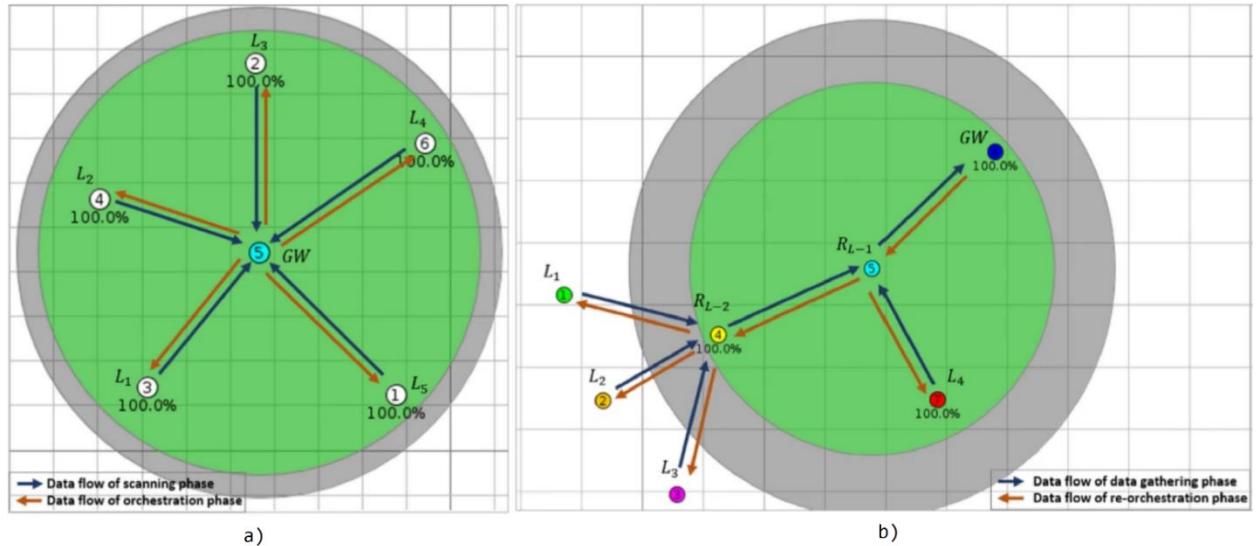


Рисунок 3.5 – Потік даних між компонентами наземної мережі для фази сканування до оркестрації (a) та наступних фаз збору даних після оркестрації (b)

Модель споживання енергії наземної мережі, як обговорювалося в попередньому розділі, базується на визначенні часу циклу кожного SN для кожного стану, включаючи передавання, прийом, очікування та низьке енергоспоживання. У спробі дослідити споживання струму вузлами Cooja, поточні профілі двоступеневої комунікації між кінцевими вузлами, маршрутизаторами та шлюзами представлені на рисунку 3.6 та рисунку 3.7. Час активних станів передавання, прийом, очікування та низьке енергоспоживання отримується за час циклу на основі інструменту energytrace в симуляторі мережі Cooja. Також значення споживання струму для кожного режиму очікування, активності та низького енергоспоживання досліджуються з технічного опису модулів Texas Instrument на базі чіпів CC2538 та припускаються на основі Таблиці 3.1. Величина напруги розглядається як однакова для всього експерименту.

## Параметри енергоспоживання модулів на основі CC2538

№	Назва	Значення
1	Споживання струму при передачі в активному режим	24 мА
2	Споживання струму приймача в активному режимі	20 мА
3	Режим очікування	13 мА
4	Споживання струму в режимі низького енергоспоживання	0,6 мА
5	Діапазон напруги живлення	2-3,6В

На рисунку 3.6 показано поточні профілі для вузлів Leaf та router-L1, що перебувають під контролем. З графіка легко визначити інтервал пакетів та перевірити, чи пристрій переходить у режим живлення між пакетами. Спочатку вузол-ліст знаходиться в режимі низького енергоспоживання протягом заданого часового циклу, потім він змінює свій режим з режиму низького енергоспоживання на режим очікування, а пізніше на режим передачі, щоб ініціювати передачу (див. рисунок 3.6).

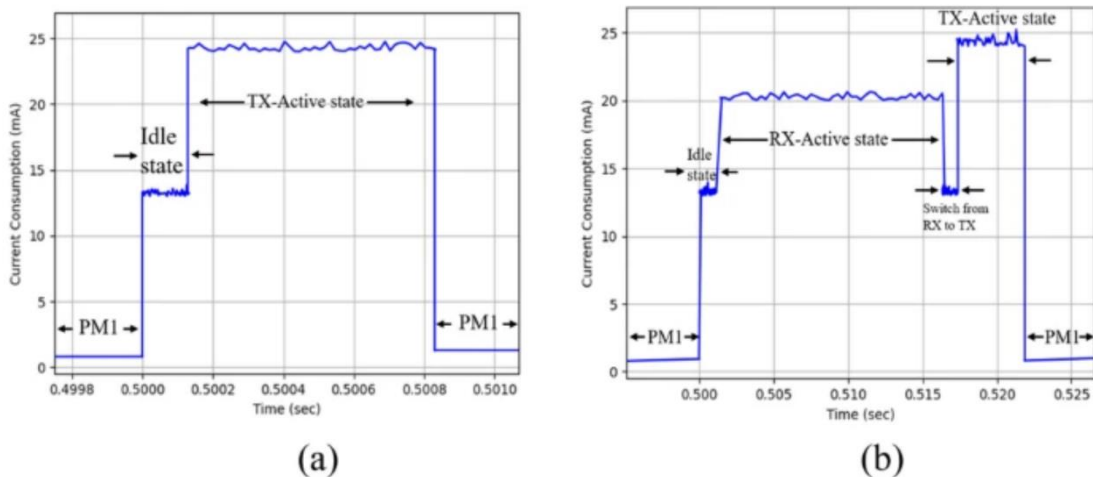


Рисунок 3.6 - Споживання струму для розповсюдження пакетів кожним кінцевим вузлом ( а ) та розповсюдження та отримання пакетів кожним вузлом маршрутизатора L1 ( б ) за часовий цикл

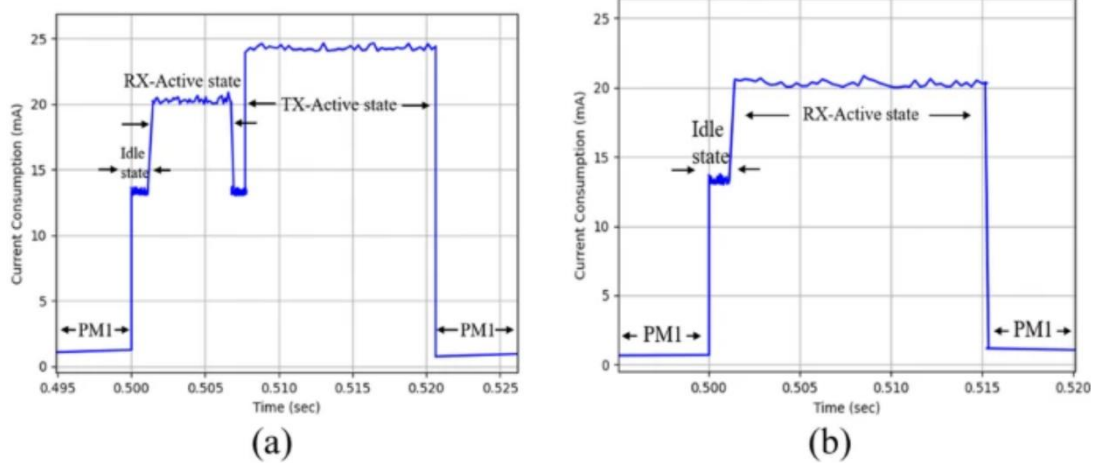


Рисунок 3.7 - Споживання струму для передачі та прийому пакетів вузлом маршрутизатора-L2 (а) та прийому пакетів шлюзом (b) за часовий цикл

Потім, як тільки весь пакет буде розповсюджено протягом часу розповсюдження, модуль повертається в режим низького енергоспоживання для економії енергії. Зауважте, що тривалість, протягом якої кінцевий вузол знаходиться в періоді розповсюдження, сильно залежить від розміру розроблених пакетів, який дорівнює 0,83 мс. На рисунку 8b також показано значення профілю струму для маршрутизатора-L1 після того, як він виділить мс свого часу циклу для прийому та 4,53 мс для активних режимів розповсюдження відповідно. Між режимами прийому та передачі існує значний час для перемикання приймача з режиму прийому в режим передачі. Слід зазначити, що час прийому для маршрутизатора L-1 вищий, ніж час передачі, заснований на симуляторі Cooja, через відповідальність за одночасне отримання та передачу даних кількох кінцевих вузлів до маршрутизатора-L2.

На рисунку 3.7а також показано поточний профіль для маршрутизатора L2, який перебуває в режимі , після того, як він виділить 5,36мс часу циклу для прийому та 13,84 мс для активних режимів поширення відповідно. Час стану поширення в маршрутизаторі L2 довший, ніж у маршрутизаторі L1, через додаткове підключення кінцевого вузла до маршрутизатора L2, а також інші дані, що передаються до маршрутизатора L2 для передачі координатору. Поточний профіль для шлюзового вузла показано на рисунку 3.7b, на якому

режим приймача активний протягом 13,84 мс протягом кожного часу циклу 1,536 секунди.

Дані результати є частиною експерименту з вимірювання профілю струму для заданої двострибкової мережі за допомогою симулятора Contiki-Cooja та модулів CC2538. Такий самий експеримент проводиться для дослідження споживання струму для альтернативних структур мережі, таких як зірка, однострибкова мережа тощо. Сукупне споживання енергії вимірюється для мережі з кількома різноманітними структурами на основі різного розподілу компонентів мережі, як показано на рисунку 3.4.

Модель визначена та проаналізована на основі отриманого оптимального шляху БПЛА та оновленої архітектури мережі після фази оркестрації мережі на рисунку 3.4, а результати моделювання представлені на рисунках 3.8 та 3.9.

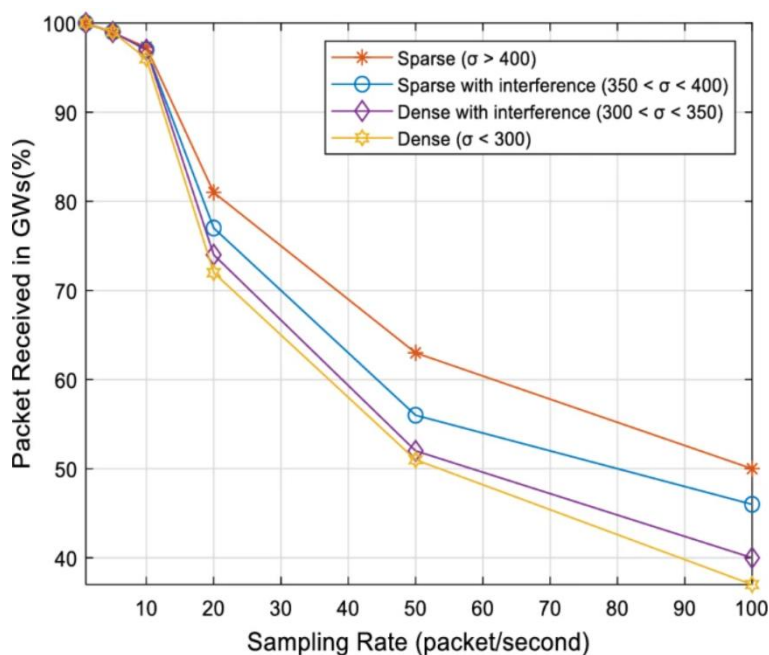


Рисунок 3.8 - Пакет, отриманий у шлюзах від кінцевих вузлів у наземній мережі зв'язку

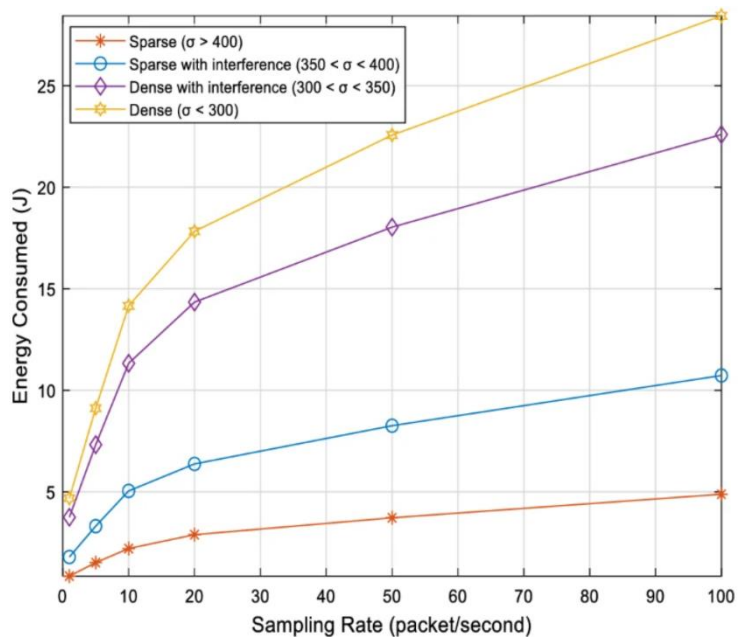


Рисунок 3.9 - Споживання енергії наземною мережею з точки зору швидкості передачі повідомлень та коефіцієнта розкиду вузлів шлюзу

Час моделювання встановлено на рівні 60 секунд у Contiki-Cooja, оскільки середнє вікно зв'язку між БПЛА та шлюзами в зв'язку "повітря-земля" становить 60 секунд на основі визначеної швидкості БПЛА, а вікно зв'язку БПЛА-шлюзу вважається 60 секунд для всіх шлюзів. Отже, час моделювання для кожної групи вважається 60 секунд у Contiki-Cooja, що еквівалентно тому ж періоду, коли БПЛА знаходиться в межах вікна зв'язку заданого шлюзу. Тут обчислюються та показані на рисунках 3.8 та 3.9 характеристики зв'язку наземної мережі, такі як накопичені отримані пакети в шлюзах та споживання енергії всією мережею на основі діапазону різної розрідженості мережі та швидкості передачі повідомлень зв'язку. Як показано на цих двох рисунках, щоразу, коли щільність мережі збільшується, доставка пакетів наземної мережі та витрати енергії на передачу повідомлень від вузла до шлюзу збільшуються через вплив перешкод від інших членів групи. Крім того, з цих рисунків очевидно, що зі збільшенням швидкості передачі повідомлень кількість отриманих пакетів у буферах шлюзів зменшується, а споживання енергії наземною мережею збільшується. Причина цього полягає в тому, що зі збільшенням швидкості передачі повідомлень збільшується і час циклу роботи компонентів наземної мережі, що призводить до

споживання ними більше енергії, водночас доставляючи менше пакетів до шлюзів.

### 3.3 Моделювання зв'язку "повітря-земля" на основі стратегії SDWSN

Для запропонованої моделі зв'язку SDWSN для зв'язку "повітря-земля" між обраними шлюзами та БПЛА використовується мережевий симулятор CupCarbon. У CupCarbon можна розробити численні сценарії збору даних "повітря-земля" для оцінки продуктивності мережі моделі зв'язку SDWSN. Конструкція тестового стенду базується на визначенні кількох раундів для фаз зв'язку БПЛА-Земля, включаючи фази сканування до оркестрації або збору даних після оркестрації. На рисунках 3.10 та 3.11 зображено ці дві фази моделювання на основі розподілу вибраних шлюзів у CupCarbon.



Рисунок 3.10 - Зв'язок "повітря-земля" між обраними шлюзами та БПЛА для фази сканування до оркестрації в CupCarbon



Рисунок 3.11 - Моделювання зв'язку "повітря-земля" для фази збору даних після оркестрації на CupCarbon

В обох сценаріях усі параметри вважаються фіксованими. Розташування вузлів шлюзу в CupCarbon вважається таким самим, як і в тестовій моделі наземної мережі Contiki-Cooja, що полегшує зв'язок повітря-Земля з дроном. Крім того, розмір даних, що буферизуються в кожному обраному шлюзі, визначається обчисленими накладними витратами на зв'язок для кожного шлюзу в Contiki-Cooja. Швидкість, довжина та форма шляху БПЛА базуються на оптимізованих конструкціях шляху в межах нечіткого маршруту. Дальність передачі повітря-Земля, як показано на рисунку 3.3, вважається до 550м у CupCarbon, коли середній RSSI нижче  $-80\text{dBm}$ . Причина цього полягає в тому, що швидкість зв'язку для цієї дальності передачі зазвичай є справедливою.

Зв'язок «повітря-земля» перевіряється з урахуванням руху БПЛА по плавних та оптимальних траєкторіях протягом визначеного вікна зв'язку для кожного обраного шлюзу. БПЛА відповідає за збір накопичених даних з кожного шлюзу під час проходження через діапазон зв'язку кожного шлюзу. Довжина шляху дорівнює довжині, необхідній БПЛА для проходження через усі шлюзи.

Модель визначена та проаналізована на основі отриманого оптимального шляху БПЛА та оновленої архітектури мережі для фази збору даних після оркестрації з тими ж фіксованими параметрами мережі, такими як коефіцієнт вибору шлюзу та розподіл вузлів, що підтримують роботу шлюзу, щоб

спостерігати вплив зміни параметра коефіцієнта розкиду щільності на продуктивність мережі. Результати моделювання представлені на рисунках 3.12, 3.13 та 3.14. У цьому розділі розраховані показники продуктивності, включаючи відсоток загальної доставки пакетів від вузлів до БПЛА, споживання енергії приймачем БПЛА та загальну вартість передачі повідомлень від сенсорів до БПЛА в мережі.

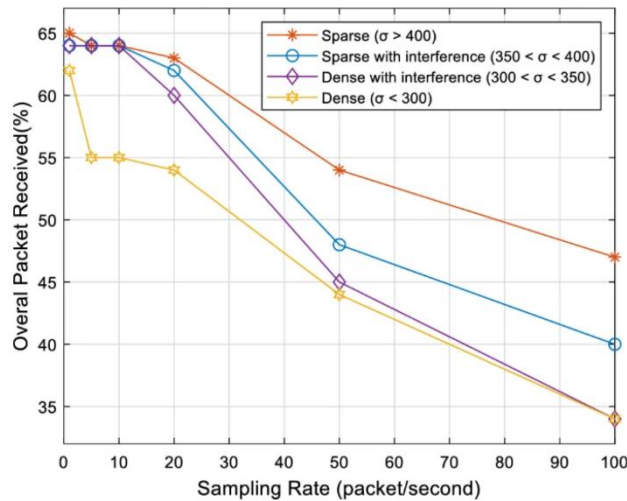


Рисунок 3.12 - Загальна доставка пакетів від сесора до БПЛА на основі швидкості повідомлень та коефіцієнта розкиду вузлів шлюзу

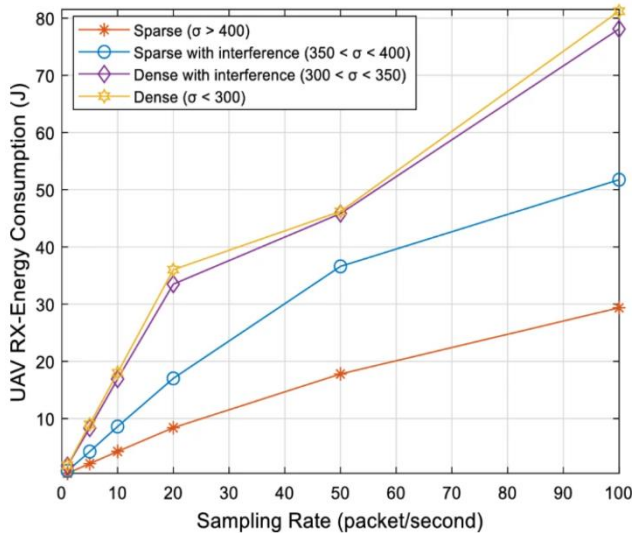


Рисунок 3.13 - Споживання енергії приймачем БПЛА з точки зору швидкості передачі повідомлень та щільності вузлів шлюзу

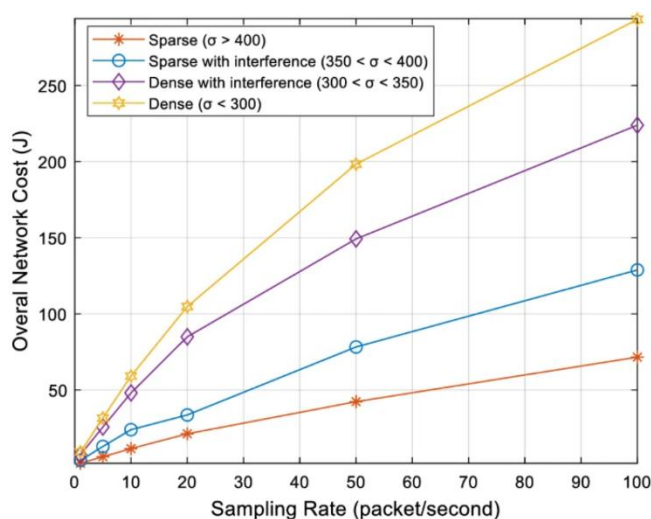


Рисунок 3.14 - Загальна вартість передачі повідомлень від сенсора до БПЛА в мережі на основі швидкості передачі повідомлень та щільності вузлів шлюзу.

Тут на рис. 3.12 представлено відсоток загальної кількості пакетів, завантажених до буфера БПЛА, на основі різних швидкостей передачі повідомлень та щільності мережі. Як показано на цьому рисунку, зі збільшенням швидкості передачі повідомлень від 1 до 5 повідомлень/сек швидкість доставки пакетів до буфера БПЛА дещо зменшується, тоді як після досягнення значення від 5 до 10 повідомлень/сек відсоток отриманих пакетів до буфера БПЛА стабілізується навколо фіксованого значення для певної щільності мережі. Причина цього полягає в тому, що за таких швидкостей передачі повідомлень БПЛА здатний збирати більшу кількість даних, що зберігаються в буфері шлюзів, під час кожного відвідування шлюзу в його вікні зв'язку, тоді як зі збільшенням коефіцієнта передачі повідомлень від 20 повідомлень/сек продуктивність наземної мережі помірно погіршується, що призводить до зниження загальної доставки пакетів до БПЛА. Іншими словами, як тільки швидкість передачі повідомлень обмежується нижчими значеннями, наземна мережа перевершує мережу "повітря-земля" з точки зору відсотка завантажених пакетів через шлюзи та БПЛА, оскільки зв'язок "повітря-земля" має нижчу швидкість доставки пакетів через мобільність БПЛА.

Зі збільшенням швидкості передачі повідомлень ситуація змінюється на протилежну: відсоток пересланих пакетів від шлюзів до БПЛА зростає, тоді як продуктивність наземної мережі погіршується. Отже, одним із рішень для покращення продуктивності доставки пакетів «кінець-в-кінець» є регулювання швидкості дрона з урахуванням швидкості передачі повідомлень, тоді як причина, чому доставка пакетів не зростає до значень більше 62% у цьому випадку, сильно залежить від цього питання. Для швидкостей нижче здатний отримувати всі буферизовані дані, що розповсюджуються шлюзами. Крім того, як показано на цьому рисунку, щоразу, коли щільність мережі збільшується, доставка пакетів наземної мережі для передачі повідомлень «кінець-в-кінець» від сервера до БПЛА погіршується через вплив перешкод від інших шлюзів на приймач БПЛА.

Інші енергозалежні характеристики, включаючи кількість енергії, споживаної приймачем БПЛА, та загальне споживання енергії для передачі повідомлень від вузлів до БПЛА, зображено на рисунках 3.13 та 3.14. Як показано на цих двох рисунках, зі збільшенням щільності мережі та швидкості передачі повідомлень зростають витрати БПЛА на отримання пакетів даних від обраних шлюзів і, отже, загальні витрати мережі на доставку повідомлень від вузлів до дрона.

Також на рисунку 3.15 представлено доставку пакетів для наземної мережі (від кінцевих вузлів до шлюзів), мережі «повітря-земля» (від шлюзів до БПЛА) та наскрізної мережі для двох різних фаз (фаза сканування до оркестрації та фаза збору даних після оркестрації) на основі різної щільності мережі (від щільної до розрідженої мережі). Зауважте, що оптимальні шляхи були отримані як для фаз сканування до оркестрації, так і для фаз збору даних після оркестрації. Як показано на цьому рисунку, доставка пакетів для фази сканування (через землю, повітря-землю та наскрізний зв'язок) вища, ніж для фази збору даних для різної щільності мережі. Крім того, коефіцієнт вибору шлюзу встановлено на для фази сканування, що означає, що всі вузли з можливістю роботи зі шлюзом сприяють передачі керуючих даних до БПЛА, тоді як коефіцієнт вибору шлюзу для фази

збору даних обирається як , що означає, що лише частина вузлів з можливістю роботи зі шлюзом сприяють процесу збору даних. В результаті, швидкість доставки пакетів для сканування перевищує фазу збору даних.

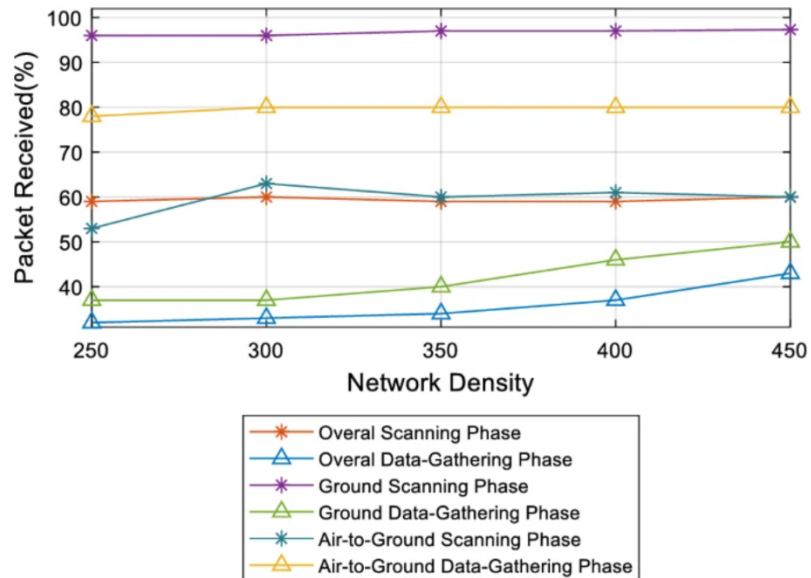


Рисунок 3.15 - Доставка пакетів для наземної мережі (від кінцевих вузлів до шлюзів), мережі «повітря-земля» (від шлюзів до БПЛА) та наскрізної мережі для двох різних фаз

Нарешті, на рисунку 3.16 представлено споживання енергії наземною мережею, мережею «повітря-земля» та наскрізною мережею як для фази сканування до оркестрації мережі, так і для фази збору даних після оркестрації мережі на основі різної щільності мережі. З цього рисунка очевидно, що фаза збору даних споживає більше енергії, ніж фаза сканування. Крім того, під час обох фаз сканування мережі та збору даних наземна мережа споживає більше енергії, ніж зв'язок у мережі «повітря-земля». Однією з причин цього є те, що кількість мережевих об'єктів, що беруть участь у процесі зв'язку в наземній мережі, вища, ніж у мережі «повітря-земля». Нарешті, якщо одночасно розглянути рис. 17 та 18 , то можна побачити значний розрив в енергії між загальним споживанням енергії на фазі збору даних та сканування мережі, і такий самий розрив помітний у загальній продуктивності швидкості доставки

пакетів.

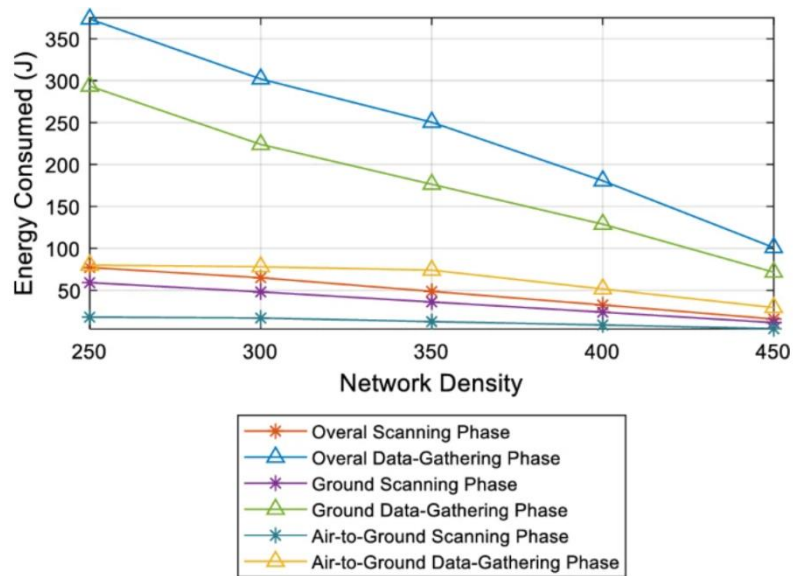


Рисунок 3.16 - Споживання енергії для наземної мережі (від кінцевих вузлів до шлюзів), мережі «повітря-земля» (від шлюзів до БПЛА) та наскрізної мережі для двох різних фаз

Затримка зв'язку, пов'язана з фазами передоркестрації та післяоркестрації на основі різної щільності мережі, представлена на рисунку 3.17. Тут вихідні дані сценаріїв Contiki Cooja, представлені часовими позначками, підтверджуються запропонованою аналітичною моделлю затримки, де фаза передоркестрації має меншу затримку зв'язку завдяки конструкції структури пакетів, а також типу топології. Підсумовуючи, процес оркестрації шляхом налаштування мережевих ролей є ефективним способом покращення функціональності мережі, оскільки цей процес коштує менше, має менше споживання енергії та затримку зв'язку, а також вищу швидкість доставки пакетів.

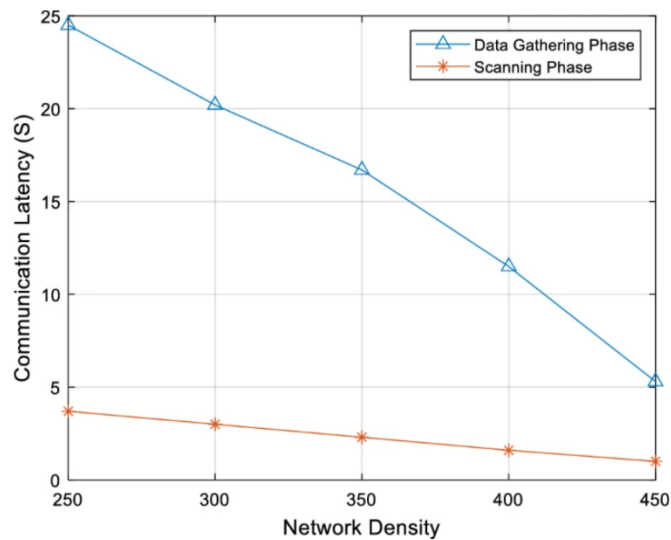


Рисунок 3.17 - Затримка зв'язку для передачі повідомлень від вузлів до хмари через БПЛА залежно від різної щільності мережі

Для порівняння запропонованого методу з методом, описаним у [24], запропонований метод мережевого зв'язку SDWSN демонструє кращу продуктивність з точки зору швидкості успішного обслуговування сенсорних вузлів після процесу конфігурації. Це порівняння базується на різних метриках масштабованості мережі, в яких запропонований мережевий зв'язок SDWSN порівнюється з методом послідовного опуклого наближення (SCA) у [24].

Параметри мережі встановлені на для розподілу вузлів, що підтримують шлюз, для коефіцієнта вибору шлюзу на етапі збору даних після процесу конфігурації, та для коефіцієнта розкиду щільності, який знаходиться між щільною та розрідженою мережами. Згідно з рисунком 3.18, зі збільшенням кількості розсіяних вузлів у полі, кількість обслуговуваних сенсорних вузлів у запропонованому методі отримує більший розрив від алгоритму SCA. Крім того, складність запропонованої комунікаційної мережі значно нижча, ніж у алгоритму SCA [24], який використовує складні неопуклі/опуклі алгоритми оптимізації для вирішення задач планування траєкторії БПЛА на основі з'єднань.

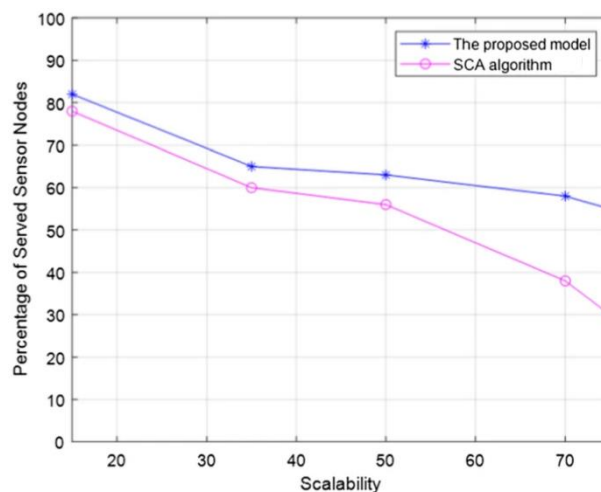


Рисунок 3.18 - Порівняння запропонованого методу збору даних SDWSN та алгоритму SCA щодо відсотка обслуговуваних сенсорних вузлів у порівнянні з масштабованістю

Після тестування запропонованої моделі збору даних SDWSN у кількох сценаріях з використанням запропонованих інструментів моделювання, для оцінки запропонованої моделі записуються вихідні дані інструментів моделювання, включаючи обслуговувані сенсорні вузли, споживання енергії наземної мережі, доставку пакетів "повітря-земля", середнє споживання енергії БПЛА на етапах збору даних до та після оркестрації сканування, а також затримка зв'язку.

Існує компроміс між споживанням енергії двигуном БПЛА та вартістю енергії наземної мережі. Хоча проектування процесу після оркестрації може запропонувати економічно ефективний шлях для БПЛА та обслуговувати більший відсоток наземних сенсорних вузлів для збору даних, це свідчить про неефективну модель для наземних сенсорних вузлів через багатострибкові протоколи зв'язку в структурі наземної мережі. Навпаки, хоча проектування процесу до оркестрації споживає більшу кількість батареї БПЛА на місію з меншим відсотком обслуговуваних сенсорних вузлів, воно пропонує функціональність оркестрації/реоркестрації мережі для наземної мережі з меншим споживанням наземної енергії. Щоб обґрунтувати існування кількох вузлів із шлюзовими можливостями в наземній мережі, хоча розгортання кількох

вузлів із шлюзовими можливостями може виснажити батареї датчиків та знизити живучість наземної мережі, це не означає, що високий відсоток популяції вузлів повинен одночасно діяти як шлюзи. Виходячи з запропонованої моделі, розподіл вузлів із шлюзовими можливостями обмежений 30% від усієї мережі. Більше того, під час фази програмування, найефективніші вузли з підтримкою шлюзів обираються як шлюзи, що показує, що решта шлюзів, які не призначені як шлюзи, можуть бути переведені на вузли з нижчою функціональністю (такі як кінцеві вузли) з меншими енерговитратами.

Результати моделювання як на етапах сканування до оркестрації, так і на етапах збору даних після оркестрації, згаданих вище, показали, що оркестрація відіграє важливу роль в обслуговуванні більшої кількості субмодулів (SN) на землі з вищими швидкостями доставки пакетів "повітря-земля" та покращенням енергоефективності БПЛА порівняно із ситуацією до оркестрації.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено комплексне дослідження методів підвищення ефективності збору даних у бездротових сенсорних мережах із використанням безпілотних літальних апаратів та програмно-визначеної архітектури. На основі теоретичного аналізу та моделювання встановлено, що традиційні сенсорні мережі мають низку суттєвих обмежень, зокрема високе енергоспоживання вузлів, нестабільність зв'язку та труднощі із масштабуванням, що значно знижує їх ефективність під час роботи у складних або розподілених середовищах. Використання БПЛА як мобільних колекторів даних дає змогу усунути частину цих проблем, зменшити кількість ретрансляцій, знизити навантаження на наземні вузли та забезпечити доступ до важкодоступних ділянок мережі.

У ході дослідження сформульовано та обґрунтовано концепцію нечіткого маршруту польоту безпілотного апарата, що дозволяє будувати плавні траєкторії руху, зменшувати втрати енергії під час маневрування та покращувати якість каналу «повітря–земля». Запропоновано методи адаптивного керування топологією в межах програмно-визначеної сенсорної мережі, які дають можливість динамічно змінювати ролі вузлів, формувати кластери та оптимізувати маршрути відповідно до умов конкретної місії. Це забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження, дозволяє збільшити тривалість роботи мережі та підвищує її стійкість до змін навколишніх умов.

Для оцінювання ефективності запропонованих рішень створено багаторівневий симуляційний стенд із використанням MATLAB, Contiki-Cooja, CupCarbon та Mission Planner. Проведені експерименти підтвердили, що оптимізація траєкторій БПЛА, правильний вибір шлюзових вузлів та впровадження механізмів централізованої оркестрації дозволяють зменшити енергоспоживання як повітряної, так і наземної частини системи та підвищити відсоток доставлених пакетів. Встановлено важливі залежності між щільністю сенсорів, частотою генерації даних, конфігурацією мережі та її продуктивністю.

Отримані результати свідчать, що поєднання можливостей безпілотних літальних апаратів із програмно-визначеною архітектурою є ефективним підходом до створення інтелектуальних автономних систем моніторингу. Запропоновані рішення можуть бути використані у різних галузях, зокрема в екологічному спостереженні, аграрному виробництві, промисловій діагностиці, контролі критичної інфраструктури та реагуванні на надзвичайні ситуації. Проведене дослідження підтверджує перспективність подальшого розвитку методів планування траєкторій, удосконалення алгоритмів оркестрації та розширення можливостей сенсорних мереж для роботи у реальних умовах.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Романюк А.В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 4. – 2018. – С. 84 – 91.
2. 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
3. Фесенко, Г. (2020). Особливості визначення оптимального плану використання флотів БПЛА заданого радіусу дії для моніторингу об'єктів на території атомних станцій. Науковий журнал «Інженерія природокористування». 62-67. 10.37700/enm.2019.4(14).62-67.
4. Печурін, М.К & Боярінова, Ю.Є & Кондратова, Л.П & Воронін, М.Г & Сіренко, М.А.. (2022). Моделі топологій слабовипромінюючої телекомунікаційної системи взаємодіючих БПЛА. Problems of Informatization and Management. 4. 48-54. 10.18372/2073-4751.72.17461.
5. Романюк А.В. Задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 2. – 2018. – С. 103 – 112.
6. Жук О.В. Моделі побудови покриття і виявлення цілей в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, В.В. Тарасов, Д.В. Ткаченко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3. – С. 41 – 48.
7. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексеева, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи. – 2017. – № 2. – С. 15 – 23, РІНЦ. ISSN 1028-9763.

8. Романюк А.В. Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк, С.В. Валуйський, О.І. Лисенко // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2015. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2015. – С. 381 – 383.
9. Романюк А. Методи збору даних моніторингу від вузлів безпроводних сенсорних мереж з використанням БПЛА [Електронний ресурс] / А. Романюк, О. Лисенко, Т. Стрела // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції „Перспективи телекомунікацій”. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – С. 333 – 335.
10. Романюк А.В. Методи збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // XI науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО”, 2018. – С. 197 –198.
11. Özkasap, Ö. (2019). A survey of energy efficiency in SDN: Software-based methods and optimization models. *Journal of Network and Computer Applications*, 137, 127–143.
12. Karegar, P. A., Al-Anbuky, A. Travel path planning for UAV as a data collector for a sparse WSN, In: 2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). IEEE (2021).
13. Karegar, P. A., & Al-Anbuky, A. (2022). UAV-assisted data gathering from a sparse wireless sensor adaptive networks. *Wireless Networks*, 29, 1–18.
14. Karegar, P. A., Al-Anbuky, A. UAV as a data ferry for a sparse adaptive WSN, In: 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). IEEE (2022).
15. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42.

16. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems. *IEEE Transactions on Communications*, 64(12), 4983–4996.
17. Mozaffari, M., et al. (2016). Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(6), 3949–3963.
18. Zhan, C., Zeng, Y., & Zhang, R. (2017). Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network. *IEEE Wireless Communications Letters*, 7(3), 328–331.
19. Zeng, Y., Xu, X., & Zhang, R. (2018). Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(4), 2233–2246.
20. Hayajneh, K. F., et al. (2021). 3d deployment of unmanned aerial vehicle-base station assisting ground-base station. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 1–11.
21. Al-Hamid, D. Z., Al-Anbuky, A., Vehicular network dynamic grouping scheme, In: 2021 IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems Companion (ACSOS-C). IEEE (2021).
22. Al-Hamid, D. Z., Al-Anbuky, A., Vehicular grouping protocol: towards cyber physical network intelligence, In: 2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings). IEEE (2021).
23. Zeng, D., et al., Evolution of software-defined sensor networks, In: Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), 2013 IEEE Ninth International Conference on. IEEE (2013).
24. Karegar, M. A., Kusche, J., Geremia-Nievinski, F., & Larson, K. M. (2022). Raspberry Pi reflector (RPR): A low-cost water-level monitoring system based on GNSS interferometric reflectometry. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2021WR031713>