

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

БЕРНАСЬ Зеновій Борисович

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА /
AUTOMATED DATA COLLECTION SYSTEM USING UAVS

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
З.Б. Бернась

Науковий керівник:
д.т.н., професор А.О. Саченко

Магістерську роботу допущено до захисту:
" ____ " _____ 2024р.

Завідувач кафедри
_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2024

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.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бернась Зеновій Борисович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Автоматизована система збору даних із використанням БПЛА / Automated data collection system using UAVs

керівник роботи _____ д.т.н., професор, А.О. Саченко

затверджені наказом по університету від 12 грудня 2023 р. № 753

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

2 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Системи моніторингу віддалених об'єктів
2. Системи збору даних за допомогою БПЛА
3. Дизайн траєкторії для збору даних є важливим етапом оптимізації роботи системи збору інформації за допомогою БПЛА

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Аналіз систем збору даних за допомогою БПЛА
2. Проектування системи збору даних на основі БПЛА
3. Симуляція роботи системи БПЛА-БСМ

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Оцінка розташування сенсорів в точному і в наближеному варіантах
2. Обчислені траєкторії, що проходять через або поблизу голів кластерів
3. Кластерна БСМ

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 12 грудня 2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	1. Аналіз систем збору даних за допомогою БПЛА	12.2023р. – 02.2024р.	виконано
2	2. Проектування системи збору даних на основі БПЛА	03.2024р. – 06.2024р.	виконано
3	3. Симуляція роботи системи БПЛА-БСМ	07.2024р. – 11.2024р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату та виправлення недоліків	01.11.2024– 30.11.2024	виконано

Студент

(підпис)

З.Б. Бернась

Керівник роботи

(підпис)

д.т.н., професор, А.О. Саченко

АНОТАЦІЯ

Бернась Зеновій Борисович. Автоматизована система збору даних із використанням БПЛА.

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. 2024.

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз концепції розподілених сенсорних мереж (БСМ) та їх інтеграції з безпілотними літальними апаратами (БПЛА), розглянуто алгоритми виявлення, кластеризації та планування траєкторій збору даних, а також виконано симуляцію та експериментальну перевірку запропонованих методів. Розроблено ефективні підходи до оптимізації розташування сенсорів, кластеризації мережі та маршрутизації польотів БПЛА, що дозволяють зменшити енергозатрати, підвищити надійність і продуктивність мережі.

ANNOTATION

Bernas Z. B. Automated data collection system using UAVs.

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. 2024.

In the qualification work The qualification work analyzed the concept of distributed sensor networks (DSNs) and their integration with unmanned aerial vehicles (UAVs), considered algorithms for detection, clustering, and data collection trajectory planning, and also performed simulation and experimental verification of the proposed methods. Effective approaches to optimizing sensor placement, network clustering, and UAV flight routing were developed, which allow reducing energy consumption, increasing network reliability and performance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ЗБОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА	9
1.1 Розподілені сенсорні мережі та сфери їх застосування	9
1.2 Сенсорні мережі з використанням безпілотних літальних апаратів	11
1.3 Особливості розгортання мереж БПЛА-БСМ	14
1.4 Висновки до першого розділу	21
2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ НА ОСНОВІ БПЛА.....	23
2.1 Розроблення алгоритмів виявлення та кластеризації мережі	23
2.2 Механізм кластеризації БСМ.	30
2.3 Дизайн траєкторії для збору даних.	34
2.4 Висновки по другому розділу	37
3. СИМУЛЯЦІЯ РОБОТИ СИСТЕМИ БПЛА-БСМ	39
3.1 Оцінка розташування сенсора та планування траєкторії.....	39
3.2 Симуляція роботи БСМ та кластеризація.....	42
3.3 Перевірка роботи методу на тестовому стенді.....	48
3.4 Висновки до третього розділу	53
ВИСНОВКИ	55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
ДОДАТКИ	61

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність дослідження, присвяченого автоматизованій системі збору даних із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), зумовлена стрімким розвитком технологій Інтернету речей (IoT), розподілених сенсорних мереж (БСМ) та безпілотних систем. Розподілені сенсорні мережі відіграють ключову роль у таких сферах, як сільське господарство, екологічний моніторинг, управління інфраструктурою, рятувальні операції та військова справа. Водночас інтеграція БПЛА з такими мережами значно розширює їх функціональні можливості, дозволяючи автоматизувати збір даних у важкодоступних або небезпечних зонах, зменшити час реагування та підвищити точність отриманих результатів.

Особливе значення ця тема набуває в умовах необхідності оптимізації ресурсів, таких як енергія, час та вартість експлуатації мереж і дронів. Розробка алгоритмів ефективного розташування сенсорів, кластеризації мережі та планування маршрутів польотів є важливим кроком до створення високопродуктивних систем збору даних. Крім того, врахування таких аспектів, як енергозбереження та надійність, сприяє подальшому вдосконаленню розподілених сенсорних мереж та їх інтеграції з БПЛА, що відповідає сучасним тенденціям розвитку автоматизації та розумних технологій.

Мета кваліфікаційної роботи. Метою кваліфікаційної роботи є розробка автоматизованої системи збору даних на основі інтеграції безпілотних літальних апаратів із розподіленими сенсорними мережами, що забезпечує оптимізацію процесів виявлення, кластеризації, збору даних і маршрутизації польотів для підвищення енергоефективності, надійності та продуктивності системи.

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 польотів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для збору даних з безпроводних сенсорних мереж (БСМ) із врахуванням енергоефективності та балансування навантаження в мережі, а також у вдосконаленні алгоритмів кластеризації, що забезпечують підвищення надійності й продуктивності системи в умовах обмежених ресурсів.

Практичне значення отриманих результатів: полягає у можливості впровадження розроблених методів оптимізації траєкторій польотів БПЛА та алгоритмів кластеризації БСМ для створення енергоефективних та надійних систем збору даних, які можуть застосовуватися у задачах екологічного моніторингу, сільського господарства, інфраструктурного контролю та в інших сферах, де потрібна автономність і ефективність роботи сенсорних мереж у складних умовах.

Апробація.

1. Бернась З. Б. Автоматизована система збору відеоданих із використанням БПЛА // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 87): матеріали Міжнародної наукової інтернетконференції, (м. Тернопіль, Україна, м. Ополе, Польща, 11-12 квітня 2024 р.). Тернопіль, 2023. – С. 21-23.

2. Аналіз методів забезпечення безпеки в безпроводних сенсорних мережах / Шевчук Б.М., Родзь Я. Т., Бернась З.Б., Заставний О.М. // Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму «Захист інформації».- Тернопіль.- 2024.- С. 127-130.

1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ЗБОРУ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

1.1 Розподілені сенсорні мережі та сфери їх застосування

Розподілені безпроводні сенсорні мережі мають низку переваг, які роблять їх незамінними в багатьох сферах. Насамперед, такі системи є енергоефективними, адже вузли сенсорної мережі можуть працювати автономно протягом тривалого часу, використовуючи батареї або джерела відновлюваної енергії, такі як сонячні панелі. Це дозволяє розгорнути мережу у важкодоступних місцях, де немає можливості забезпечити постійне живлення [3].

Також значною перевагою є масштабованість системи. Додавання нових вузлів до мережі не потребує значних витрат або складних налаштувань, що робить WSN ідеальними для динамічних середовищ, таких як сільське господарство чи моніторинг розподілених об'єктів. Висока надійність і здатність самовідновлюватися також є важливими: у разі виходу з ладу одного вузла мережа може автоматично перенаправити трафік через інші вузли, забезпечуючи безперервність роботи [4].

Ще однією перевагою є можливість інтеграції з іншими технологіями, такими як хмарні сервіси або штучний інтелект. Це дозволяє створювати розумні системи, що не лише збирають дані, але й аналізують їх у реальному часі, генеруючи прогнози чи рекомендації. Крім того, безпроводна архітектура виключає потребу в прокладанні кабелів, що знижує витрати на впровадження й обслуговування мережі.

Однією з найбільш поширених сфер використання WSN є сільське господарство [5]. Розподілені сенсори дозволяють вимірювати параметри ґрунту (вологість, температура, кислотність) та кліматичні умови, що сприяє ефективнішому використанню ресурсів, таких як вода та добрива. Дані з сенсорів допомагають фермерам оптимізувати процеси вирощування культур, підвищуючи врожайність і знижуючи екологічний вплив.

У промисловості WSN використовуються для моніторингу технічного стану обладнання. Завдяки сенсорам, які збирають інформацію про вібрації, температуру, тиск або рівень шуму, можна своєчасно виявляти ознаки несправностей та проводити профілактичне обслуговування, мінімізуючи ризики аварій і простоїв. У цьому контексті сенсорні мережі є важливим елементом концепції Індустрії 4.0.

Екологічний моніторинг також є важливою сферою застосування WSN. Сенсори дозволяють вимірювати рівень забруднення повітря, води чи ґрунту, контролювати стан лісів, моніторити рівень води в річках і озерах. Такі системи використовуються для оцінки впливу людської діяльності на навколишнє середовище та запобігання екологічним катастрофам.

Ще однією перспективною сферою є міська інфраструктура. Безпроводні сенсорні мережі використовуються в концепції "розумного міста" для моніторингу транспортних потоків, якості повітря, рівня шуму або навіть заповнення сміттєвих баків. Завдяки цьому міста стають більш зручними та екологічними для своїх мешканців.

Також WSN знаходять застосування в охороні здоров'я. Носимі пристрої з вбудованими сенсорами дозволяють контролювати стан пацієнтів у реальному часі, відстежуючи такі параметри, як частота серцевих скорочень, рівень кисню в крові або артеріальний тиск. Це особливо актуально для людей із хронічними захворюваннями, адже забезпечує постійний моніторинг без необхідності частих візитів до лікарів.

Загалом, розподілені безпроводні сенсорні мережі є універсальним інструментом, який можна адаптувати до потреб будь-якої галузі, забезпечуючи збір і обробку даних у реальному часі. Їх використання підвищує ефективність роботи систем, знижує витрати та створює нові можливості для впровадження інновацій.

1.2 Сенсорні мережі з використанням безпілотних літальних апаратів

Сенсорні мережі з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є сучасним рішенням для збору даних із розподілених вузлів у різних сферах. Інтеграція БПЛА в архітектуру безпроводних сенсорних мереж (WSN) дозволяє значно розширити можливості таких систем, особливо у випадках, коли об'єкти моніторингу розташовані у важкодоступних або віддалених місцях [9].

Головною перевагою використання БПЛА є мобільність. Завдяки здатності до автономного пересування, дрони можуть охоплювати великі території, забезпечуючи доступ до сенсорів, розташованих у географічно розподілених точках. Це особливо важливо у випадках, коли традиційні стаціонарні базові станції недоступні або занадто дорогі у встановленні. БПЛА можуть не лише зчитувати дані з вузлів WSN, але й доставляти нові сенсори, замінювати батареї чи навіть здійснювати калібрування обладнання.

Ще однією важливою особливістю є можливість збору великих обсягів даних у реальному часі. БПЛА оснащуються модулями для безпроводного зв'язку (Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN) [9], що дозволяє взаємодіяти з вузлами сенсорної мережі на великій відстані. Крім того, дрони можуть використовуватися як мобільні ретранслятори, які забезпечують зв'язок між ізольованими сенсорами та центральною базовою станцією.

У сфері екології БПЛА використовуються для моніторингу якості повітря, стану водних ресурсів, лісових масивів або зміни кліматичних умов. Наприклад, дрони можуть зчитувати дані з сенсорів, які вимірюють рівень забруднення ґрунту чи концентрацію шкідливих речовин у повітрі. Це дозволяє отримувати точну картину екологічного стану територій та оперативно реагувати на зміни.

Сенсорні мережі з БПЛА активно впроваджуються в агротехнології. Дрони можуть збирати дані про вологість ґрунту, температуру, стан рослин і навіть поширення шкідників. Використовуючи ці дані, фермери можуть оптимізувати

процеси зрошення, удобрення чи захисту культур. Завдяки високій мобільності БПЛА можна швидко охопити великі площі сільськогосподарських угідь.

У промисловості та міській інфраструктурі БПЛА використовуються для моніторингу мостів, тунелів, веж, трубопроводів чи інших об'єктів. Дрони можуть збирати дані з сенсорів, які фіксують вібрації, тиск, температуру чи корозію. Це допомагає вчасно виявляти можливі пошкодження та запобігати аварійним ситуаціям.

У міському середовищі БПЛА можуть здійснювати моніторинг транспортних потоків, рівня шуму, якості повітря або заповнення сміттєвих баків. Завдяки цьому міста стають більш ефективними, екологічними та комфортними для мешканців.

Під час стихійних лих або аварій БПЛА можуть використовуватися для збору даних із сенсорів, розташованих у зоні катастрофи. Наприклад, дрони можуть отримувати інформацію про рівень радіації, концентрацію небезпечних речовин або температуру в зоні пожежі. Це дозволяє рятувальникам ефективніше планувати свої дії.

Дрони можуть легко змінювати маршрути польоту залежно від поточних потреб або умов. Вони здатні охоплювати як невеликі локальні мережі, так і масштабні розподілені системи.

Використання БПЛА дозволяє знизити витрати на встановлення стаціонарних базових станцій [8]. До того ж, у випадках оновлення чи розширення системи не потрібно витрачати ресурси на прокладання нових комунікацій.

Дрони можуть швидко реагувати на потребу збору даних або аварійні ситуації. Завдяки цьому можна вчасно отримувати актуальну інформацію для прийняття рішень.

Сучасні БПЛА оснащуються системами автономного управління, що дозволяє їм виконувати місії без постійного втручання оператора [11].

Дрони можуть передавати зібрані дані в реальному часі до хмарних платформ для подальшого аналізу, обробки та збереження. Це дозволяє забезпечувати доступ до даних із будь-якої точки світу.

Сенсорні мережі з використанням БПЛА є інноваційним і перспективним підходом до збору даних у багатьох галузях. Вони забезпечують мобільність, гнучкість та ефективність, що робить їх особливо корисними для роботи у складних умовах або на великій території[11]. У поєднанні з сучасними технологіями аналізу даних та Інтернетом речей, ці системи відкривають нові можливості для оптимізації процесів, підвищення ефективності та забезпечення екологічної стабільності.

Цей гібридний вид методу збору даних не тільки відрізняється гнучкістю збору рухомих даних, що підходить для великомасштабних БСМ, але також має головні переваги, такі як наступне.

По-перше, БПЛА можна розгортати у змінних середовищах. Методи збору даних з повітря використовують БПЛА, які можуть керуватися автоматично як мобільні збирачі даних. БПЛА не обмежуються мобільністю, як наземний транспорт, і можуть використовуватися в окремих контрольованих регіонах, до яких люди не можуть наблизитися.

По-друге, збір даних з повітря відбувається набагато швидше, ніж збір даних з землі. Для збору даних з повітря використовуються БПЛА, які мають більшу швидкість руху. Це може збільшити швидкість пошуку та відвідування вузлів, щоб скоротити життєвий цикл збору даних, коли БСМ є великомасштабним.

По-третє, використання збору даних за допомогою БПЛА матиме меншу затримку та вищу пропускну здатність. Збір даних з повітря часто має менше перешкод і ширше покриття бездротових сигналів, ніж збір даних з землі. Таким чином, це може зменшити затримку зв'язку та збільшити пропускну здатність.

Нарешті, при застосуванні механізмів збору даних БПЛА вузли сенсорів або вузли ретрансляції повинні передавати дані лише на короткі відстані, загальне споживання енергії значно зменшується.

1.3 Особливості розгортання мереж БПЛА-БСМ

В останні роки, завдяки технічному прогресу та широкому поширенню безпілотних літальних апаратів, вони були введені в сенсорні мережі, що підвищило продуктивність великомасштабного моніторингу. Багато проблем все ще залишаються відкритими, як-от оптимальне кластеризування наземних сенсорів, продуктивність зв'язку, економія енергії та планування траєкторії для оптимального збору даних із наземних сенсорів. Наприклад, спільна структура для БПЛА та наземних бездротових сенсорних мереж (БСМ) з урахуванням підходу до групування, керованого k-середніми, продуктивності зв'язку, позиції та інших факторів може призвести до підвищення продуктивності [12]. Уможливорюючи отримання вимірювань, що стосуються конкретного місця, обробку даних і обмін локальною інформацією, БСМ стали однією з найперспективніших технологій для моніторингу великої території [13]. Однак коли БСМ все частіше розгортаються на великих географічних територіях, обмеження окремих вузлів сенсорів починають перешкоджати загальній продуктивності системи моніторингу. Було встановлено, що бездротові сенсорні вузли можуть легко використовуватися надмірно через високе енергоспоживання при використанні в процесах, що передбачають безперервний обмін даними. На додаток до проблем управління енергією та передачі даних, надійність пропускну здатності даних і синхронізація часу також є основними недоліками БСМ. З точки зору керування енергією, зазвичай потрібні налаштування динамічного живлення та сну. Вони плануються на основі розкладу виконання процесу, часу доби, погоди, розкладу обслуговування тощо.

По суті, щоб подолати проблеми БСМ у широкомасштабних розгортаннях моніторингу, можна додати додаткові периферійні пристрої. Одна традиційна системна архітектура використовує фіксований вузол-приймач, оточений вузлами-сенсорами. Ця стратегія відома як статичний збір даних. Дані завантажуються за допомогою маршрутизації з одним або кількома переходами. Необхідно

враховувати високе енергоспоживання всередині сенсорних вузлів і короткий життєвий цикл вузла-приймача.

Альтернативна стратегія передбачає використання наземного мобільного вузла поглинача. Мобільний вузол-приймач обмінюється даними з вузлами сенсорів, які знаходяться на його статичному або динамічно обчисленому шляху навігації. Цей метод зменшує споживання енергії, але демонструє значний недолік, оскільки мобільний колектор обмежується плоскими судноплавними поверхнями. Щоб подолати це обмеження, мобільний вузол приймача може перевозитися БПЛА. Нещодавні дослідження показали, що така співпраця БПЛА та БСМ дозволяє широко розгортати БСМ для широкомасштабних програм моніторингу.

Особливе значення для оптимізації енергоспоживання мережі БПЛА має формування траєкторії. Генерацію опорної траєкторії можна розділити на кілька окремих етапів. По-перше, охоплюється вся зона інтересу, щоб отримати інформацію про розташування та потужність розгорнутих сенсорів. По-друге, на основі проміжного етапу агрегації (де сенсори об'єднуються в кластери та вибираються голови сенсорів для кожного кластера), БПЛА має пройти біля всіх голів сенсорів, щоб отримати інформацію. В обох випадках еталонна траєкторія базується на поняттях плоскості та наступної параметризації В-сплайну, детально обговорюваної в [14]. Перший дозволяє гарантувати здійсненність траєкторії (в тому сенсі, що він враховує динаміку БПЛА), а другий дозволяє різні алгебраїчні та геометричні гарантії (наприклад, безперервність до попередньо визначеного ступеня, включення до даної опуклої області) .

Мережа БПЛА може взяти на себе роль мобільних базових станцій, коли це необхідно, щоб перегрупувати сенсорні вузли, розміщені в зоні покриття, у кластери БСМ. За допомогою таких підмереж вимірювання навколишнього фізичного світу стає більш цілеспрямованим, більш релевантним і орієнтованим на контроль над конкретною аналізованою областю, таким чином гарантуючи, що потенційно критичні дані не будуть втрачені. Крім того, розумніші вимірювальні системи, що працюють на базі БПЛА, включають більше обробки в точці збору,

фіксуючи цінні критичні дані, які в руках потрібних людей або належного програмного рішення можуть сприяти кращим і швидшим рішенням на основі цих даних.

БСМ, які включають БПЛА, можна перетворити на програми, що пропонують певні функції та переваги, такі як:

- Збір та перевірка даних на місці: БПЛА можуть бути реалізовані як агенти даних, здатні як завантажувати дані в мережу, так і/або передавати дані на базові станції [7];

- Підтримка кластеризації: БПЛА можуть підтримувати наземний механізм кластеризації БСМ шляхом вибору керівників кластерів;

- 3D-моделювання даних сенсорів: БПЛА можуть надавати картографічну інформацію (тривимірна вибірка) про цікаву територію. БПЛА також можна використовувати для підтримки наземного розгортання БСМ [8]. Це забезпечує гнучкість польотів БПЛА в будь-яке місце в зоні інтересу.

У багаторівневому представленні представлено систему БПЛА-БСМ описано, як на рисунку 1.1. Починаючи з рівня землі, система моніторингу складається з розширеної мережі сенсорів, які можна розділити на підсистеми БСМ, які далі називаються кластерами. Кластеризовані сенсорні вузли (рівень 2) збирають сенсорні дані за допомогою спеціального обладнання збору (рівень 3) і забезпечують ефективний аналіз даних за допомогою механізмів обробки даних у мережі.

Об'єднання даних сенсорів оптимально встановлюється за допомогою ефективних схем консенсусу. Як правило, за механізмом консенсусу кожен вузол сенсора виконує загальну оцінку глобального середнього значення та продовжує покращувати його значення за допомогою локального обміну інформацією між сусідами кластера. БПЛА (рівень 1) обмінюється даними з кожним кластером через один сенсорний вузол, який далі називають головою кластера. На рисунку 1.1 голови кластерів позначені червоним кольором. Міра обмеження обміну даними БПЛА-БСМ до одного вузла на кластер прийнята для того, щоб істотно зменшити

навантаження на канал зв'язку. Можна припустити, що енергоспоживання внутрішньокластерного зв'язку набагато менше, ніж потужність, необхідна для прямого зв'язку між сенсором і БПЛА.

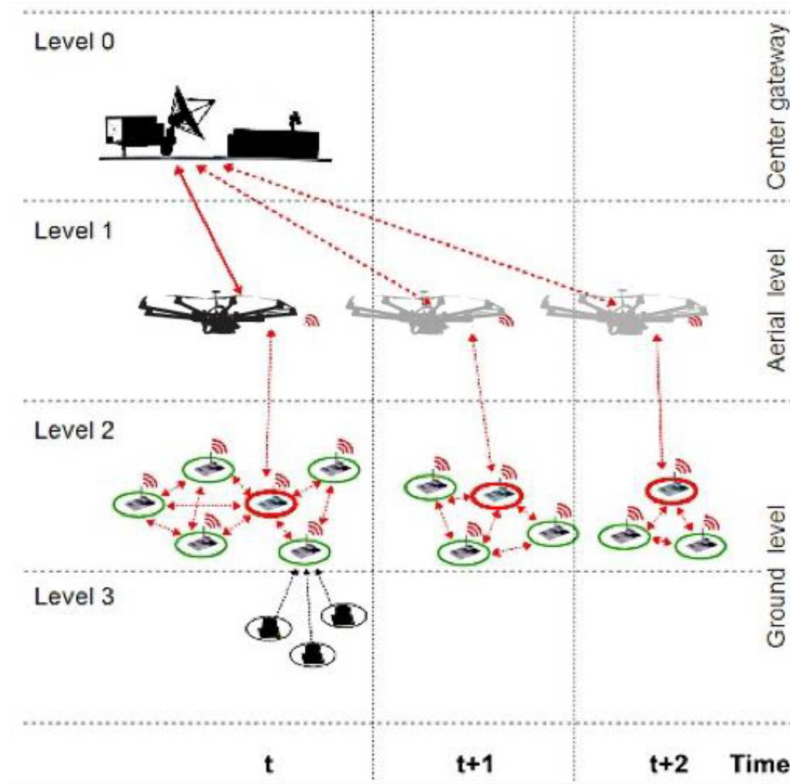


Рисунок 1.1 - Багаторівневе представлення системи БПЛА-БСМ

Відповідна сенсорна інформація передається БПЛА на наземну станцію (шлюз центру — рівень 0). Крім того, БПЛА сприяє динамічній кластеризації наземних сенсорних вузлів і механізму вибору голови кластера (ГК).

Необхідно враховувати кілька припущень щодо параметрів місії та зовнішнього середовища:

- вузли випадково розкидані в межах цікавої області; або через відсутність координати GPS, або через заважаючі фактори, такі як пориви вітру під час розгортання;
- зона інтересу має обмежені регіони, над якими польоти заборонені, наприклад: будівлі, дороги чи інші зони, де присутні люди.

Другий пункт, зокрема, викликає деякі цікаві операційні обмеження для місії: заборонені зони ігноруються мережею сенсорів, оскільки вони прозорі з точки зору зв'язку, але розглядаються як перешкоди, яких слід уникати з точки зору БПЛА.

Загальна проблема збору даних розділена, через її складність і багато вимог, на кілька послідовних підпроблем:

- якщо припустити, що положення сенсора невідоме, потрібен попередній етап, на якому БПЛА збирає дані про місцезнаходження. Це можна прирівняти до процедури фотограмметрії, під час якої досліджувана поверхня неодноразово перетинається, щоб оцінити положення сенсорів і отримати інформацію про групування кластерів, визначене на рівні БСМ;

- об'єднуючи інформацію про перешкоди, голів кластерів і обмеження зв'язку, отримуємо список можливих опорних траєкторій для БПЛА;

- Нарешті, під час польоту за допомогою зворотного зв'язку автопілота гарантується, що контрольні траєкторії відслідковуються в установлених межах допуску.

На рисунку 1.2 підсумовано робочий процес широкомасштабної системи моніторингу БПЛА-БСМ. На попередньому етапі БСМ розгортається над цільовим регіоном неконтрольованим чином і система БПЛА налаштовується. Згодом БПЛА виконує етап виявлення БСМ, і ГК вибираються з набору вузлів наземних датчиків. Потім БСМ самоорганізується навколо вибраних ГК, а траєкторії БПЛА для збору даних оптимізуються. Основний робочий цикл складається з періодичної вибірки контрольованих параметрів і ретрансляції відповідних подій на БПЛА. Зміни ГК можуть відбуватися локально, щоб збалансувати рівні заряду батареї вузла або у разі втрати зв'язку з деякими вузлами. У цьому випадку вибір ГК повторно ініціалізується, і процес повторюється.

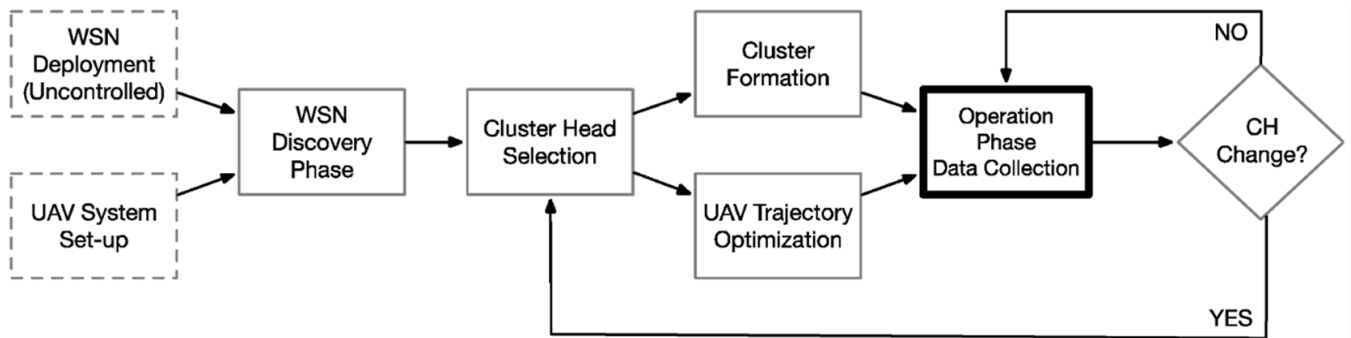


Рисунок 1.2 - Функціональна схема моніторингу гібридного БПЛА-БСМ

Як було сказано раніше, можливі методи для широкого розсіювання сенсорних вузлів включають використання повітряних транспортних засобів. Таке рішення легко призводить до нерегулярного розподілу (характеризується зв'язним графіком). Враховуючи цей аспект, обов'язковим є визначення механізму для отримання оцінки положення кожного сенсорного вузла, розміщеного на землі. Ми починаємо з визначення плану польоту, щоб забезпечити повне покриття зони інтересу. Слід враховувати кілька конкретних параметрів, таких як висота польоту, дальність радіозв'язку БПЛА, як для вузлів WSN, так і для БПЛА та інші.

Тому ми вважаємо середовище з багатьма перешкодами апіорі відомим. Тобто ми розглядаємо сукупність перешкод $O = \{O_i\} \subset \mathbb{R}^n$, як показано в прикладі підтвердження концепції, показаному на рисунку 1.2 (тоді як розмірність простору дорівнює $n = 3$ або навіть $n = 2$ якщо ми припустимо, що БПЛА літають на постійній висоті, ми збережемо n щоб підкреслити, що результати справедливі для загального виміру простору).

У цьому середовищі ми розглядаємо набір сенсорів $S = \{S_j\}$. Кожен сенсор характеризується своїм розташуванням $z_j \in \mathbb{O}$ і радіусом зв'язку r_j , перше буде визначено пізніше. На рисунку 1.3 сітка з 38 датчиків (крапки) випадковим чином розподілені по допустимій області (доповненню об'єднання трьох обмежених зон (сірих областей)).

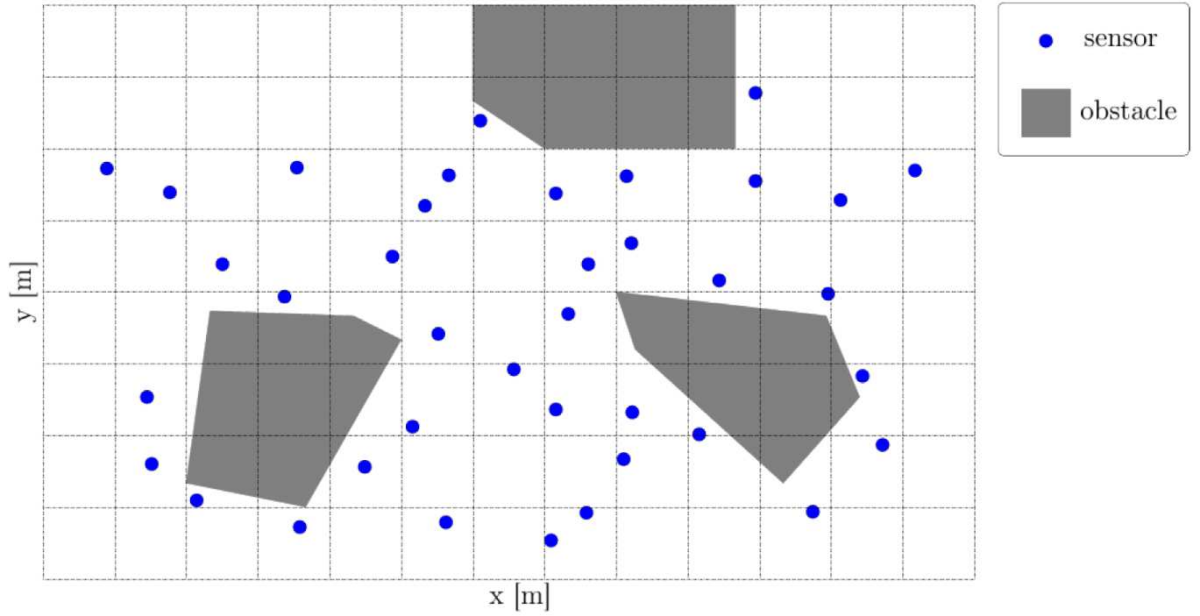


Рисунок 1.3 – Приклад задачі планування траєкторії польоту БПЛА в середовищі з багатьма перешкодами

Припускаючи, що датчики вже розгорнуті, нам потрібні початкові польоти, які охоплюють цікаву територію та на основі інформації, отриманої з землі, надають оцінку $\hat{z}_j$ справжнього розташування сенсора z_j .

Для БПЛА наступна траєкторія $r(t)$, оцінка j -та позиція датчика тоді задається як:

$$\hat{z}_j \in \hat{Z}_j \triangleq \bigcap_{t: S_j \text{ visible}} \{z : \|r(t) - z\| \leq r_j\}. \quad (1.1)$$

Рівняння (1.1) просто стверджує, що положення сенсора має лежати в межах усіх кіл із центром у точках траєкторії БПЛА, де сигнал від j -й сенсор отримано.

Поки траєкторія БПЛА $r(t)$ може бути довільною, набагато простіше припустити регулярну траєкторію: ми розглядаємо процедуру фотограмметрії, в якій БПЛА покриває область паралельними лініями, розділеними між відстанями Δ і з вимірюваннями, виконаними вздовж кожної лінії на відстані δ як показано на рисунку 1.4.

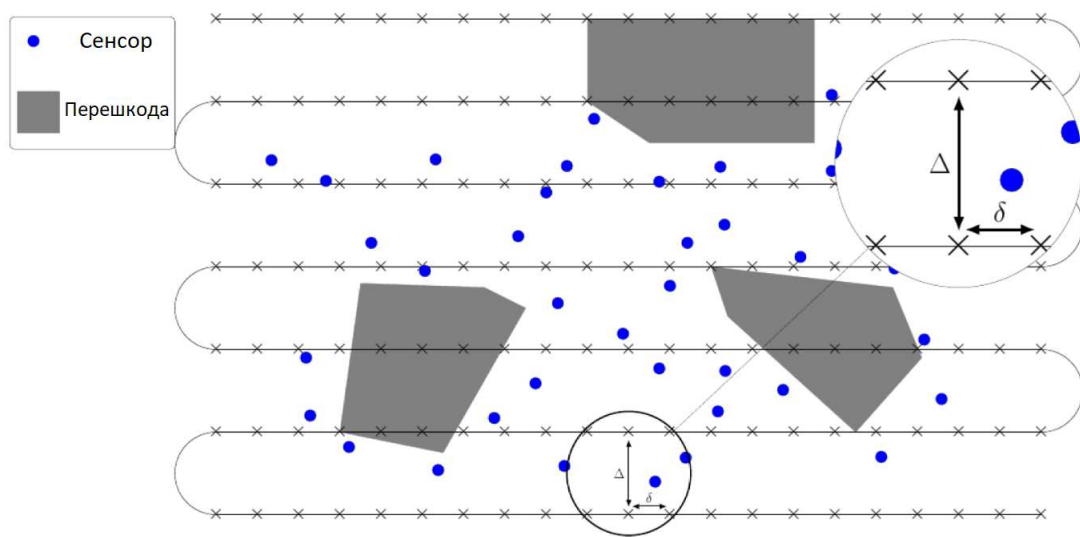


Рисунок 1.4 - Фотограмметричні траєкторії для визначення розташування сенсора

Строго кажучи, будь-яка пара (Δ, δ) , який перевіряє $\sqrt{\Delta^2 + \delta^2} < \min_j r_j$ гарантує, що жоден сенсор не буде пропущений (його «відчують» хоча б один раз під час польоту). На практиці вимагається щоб Δ і δ були достатньо малі, щоб отримати справедливую оцінку позиції. Пізніше вимагається, щоб БПЛА проводив достатньо часу поблизу голови кластера. Якщо його позиція невизначена, то більше не можемо бути впевнені, що зв'язок забезпечено.

1.4 Висновки до першого розділу

У цьому розділі проаналізовано концепцію розподілених сенсорних мереж (PCM), можливості їх інтеграції з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та особливості розгортання таких мереж. Проведене дослідження дозволяє зробити такі висновки:

1. Розподілені сенсорні мережі є ключовим компонентом для моніторингу різноманітних об'єктів та середовищ завдяки їх здатності до автономної роботи, масштабованості та економічності. Вони широко застосовуються

у сфері екологічного моніторингу, сільського господарства, охорони здоров'я, інтелектуальної інфраструктури та промисловості, що підтверджує їхню універсальність та адаптивність до різних сценаріїв.

2. Інтеграція сенсорних мереж з БПЛА розширює можливості РСМ, забезпечуючи високу мобільність, ефективний доступ до важкодоступних місць і збільшення територіального охоплення. Використання БПЛА дозволяє зменшити залежність від стаціонарної інфраструктури, підвищити оперативність збору даних і скоротити витрати на розгортання мережі в складних умовах.
3. Особливості розгортання мереж БПЛА-БСМ включають необхідність оптимізації маршрутів польотів дронів для забезпечення максимальної ефективності збору даних та мінімізації енергоспоживання. Важливими є вибір протоколів зв'язку та алгоритмів кластеризації, що впливають на продуктивність мережі. Застосування сучасних технологій, таких як 6LoWPAN, RPL і CoAP, дозволяє досягти високої надійності й енергоефективності мереж.

Таким чином, використання БПЛА у поєднанні з РСМ є перспективним напрямком для вирішення задач моніторингу та управління у різних галузях. Ефективна інтеграція цих технологій вимагає ретельного аналізу особливостей їх роботи, підбору відповідних технічних рішень і розробки оптимальних алгоритмів для їхньої взаємодії.

2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ НА ОСНОВІ БПЛА

2.1 Розроблення алгоритмів виявлення та кластеризації мережі

Як було описано в попередньому розділі, найбільш енергоефективними, для систем типу БПЛА-БСМ, є кластерні мережі. Оскільки поділ БСМ на кластери дозволяє збирати інформацію в межах одного кластера уникаючи тривалої ретрансляції повідомлень в БСМ, що значною мірою дозволяє знизити енергозатрати БСМ, а отже і підвищити тривалість «життя» БСМ та її ефективність оскільки канали зв'язку будуть більший час вільні. Таку можливість надають гібридні мережі БПЛА-БСМ [9]. Проте оскільки мова йде про самоорганізуючі мережі, а також про можливість розгортання даної мережі за допомогою БПЛА виникає певний ряд проблем які необхідно вирішити для її ефективного розгортання та роботи. А саме необхідно розбити мережу на кластери і визначити ГК та розробити ефективний маршрут польоту БПЛА, який пролягав би над ГК.

Перед початковою фотограмметричною траєкторією мережа датчиків приймає рішення про розподіл кластерів і вибирає голови кластерів[9]. Ця інформація також надсилається на БПЛА під час його першого польоту. Таким чином, друга мета «льотного зонда» полягає в класифікації та ідентифікації найкращих відповідних сенсорних вузлів для положення ГК. Сенсорні вузли оцінюються за алгоритмом відбору, який використовує кілька відповідних показників:

- кількість одноадресних повідомлень, отриманих літальним апаратом від кожного сенсорного вузла i , позначеного U_i , $U_i \in M = \{ U_1, \dots, U_n \}$, де M – набір сенсорних вузлів; набір вузлів датчиків складається з окремих вузлів датчиків, які відповідають на послідовність широкомовної передачі t , надіслану БПЛА до наземної мережі;

- максимальне значення індикатора потужності прийнятого сигналу (RSSI) (в дБм) одноадресних повідомлень, отриманих від кожного вузла датчика i , позначене $RSSI_MAX_i$, де $i \in M$;
- мінімальне значення індикатора якості зв'язку (LQI) одноадресних повідомлень, отриманих від кожного вузла i датчика, позначене LQI_MIN_i , де $i \in M$;
- останнє значення індикатора рівня батареї/енергії (у %), отримане від кожного вузла i датчика, позначене E_i , де $i \in M$;
- порядковий номер трансляції t , який використовується для розрізнення вузлів, що належать до вибору груп.

Щоб мати можливість оцінити параметри вузла, необхідно визначити динамічний список у програмній пам'яті вузла БПЛА. Структура вузла складається з унікальної адреси, одноадресного номера, індикатора потужності та якості сигналу, рівня заряду батареї та послідовності трансляції (алгоритм 1).

Для простоти впровадження та розуміння визначили файл, у якому зберігаються відповіді наземних датчиків, включаючи унікальну адресу, потужність сигналу (RSSI) на прийомі та мітку часу.

Алгоритм 1. Структура вузла та псевдокод розподілу пам'яті.

- (1) визначити структуру вузла {
- (2) покажчик на наступний вузол (в списку вузлів);
- (3) $RIME_address$;
- (4) кількість отриманих одноадресних повідомлень U ;
- (5) рівень енергії $last_E$;
- (6) максимальне значення RSSI $RSSI_MAX$;
- (7) максимальне значення LQI LQI_MIN ;
- (8) ширококомовна послідовність t ;
- (9) }
- (10) виконати розподіл пам'яті з урахуванням кількості
- (11) розгорнутих вузлів, визначених структурою вузлів;

(12) створити список вузлів.

Діалог між сенсорними вузлами базується на комунікаційному стеку RIME, використовуючи одноадресні та широкомовні повідомлення. Для цього механізму потрібні дві нитки. Рисунок 2.1 ілюструє послідовну діаграму діалогу огляду БПЛА-БСМ.

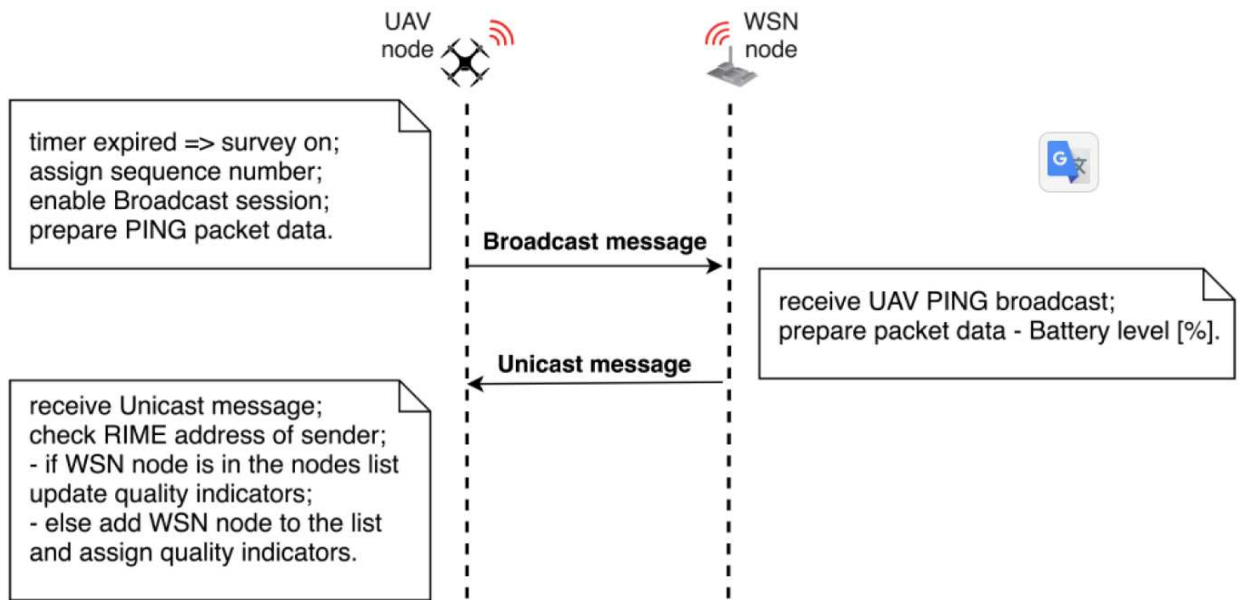


Рисунок 2.1 – Послідовність діалогу БПЛА-БСМ

Процес трансляції (алгоритм 2) керує послідовністю передачі широкомовних пакетів. Для того, щоб задовольнити обов'язкову вимогу, щоб повністю охопити зону інтересу, програму трансляції періодично викликають у певний час вибірки, який тісно пов'язаний зі швидкістю польоту. Швидкість навігації БПЛА під час експериментів становить близько 3м/с, що було визнано придатним для забезпечення зв'язку з наземними датчиками. Колізії пакетів обробляються в нижньому стеку протоколу зв'язку за допомогою механізму CSMA/CA[9]. Враховуючи той факт, що ми використовуємо систему квадрокоптера без мінімальної швидкості навігації, це забезпечує хорошу продуктивність для збору пакетів БСМ. Така послідовність широкомовного/одноадресного обміну повідомленнями описана на рисунку 2.2. Час між широкомовними викликами позначено t . Одноадресні відповіді сенсорних вузлів ілюструються зеленими

концентричними колами та позначаються u_i , де i є поточною кількістю одноадресних відповідей, отриманих від одного наземного сенсорного вузла в різних послідовностях. Діапазон радіопокриття вузла датчика позначено сірим колом. Так само дальність покриття БПЛА позначена великими червоними концентричними колами.

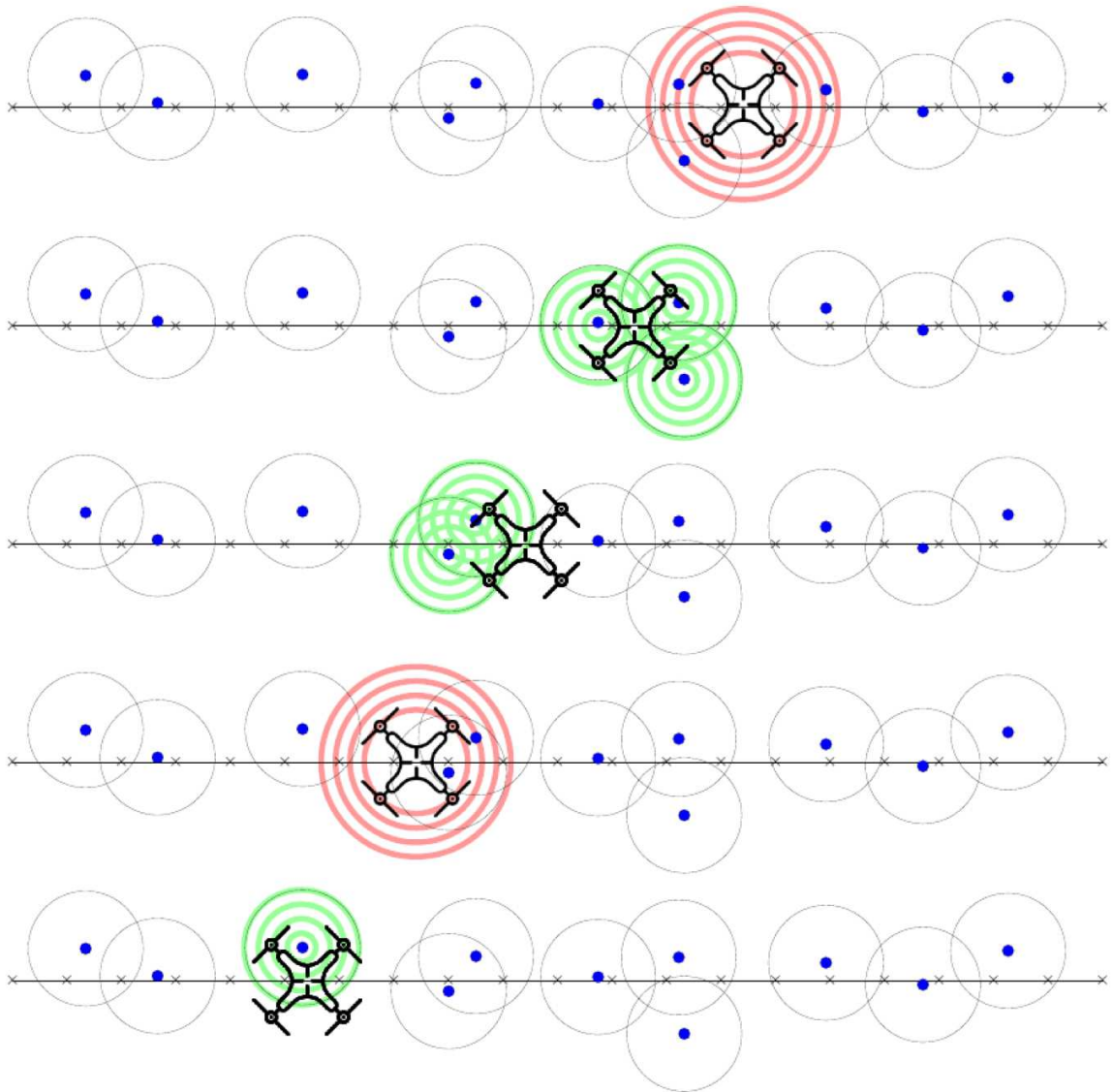


Рисунок 2.2 - Політ БПЛА для виявлення наземних вузлів БСМ.

БПЛА дозволяє транслювати сеанс за часом ("survey_ON" присвоюється true). Надсилається широкомовне повідомлення «PING», що містить порядковий номер широкомовної передачі t . Другий потік процесу керує одноадресними повідомленнями, отриманими від наземних сенсорних вузлів. Коли сенсорні вузли

отримують ширококомовне повідомлення «PING», вони відповідають вузлу БПЛА одноадресним повідомленням, у якому передається поточний рівень заряду батареї. Уникнення зіткнень для відповідей на одноадресні повідомлення обробляється нативно на сумісному з IEEE802.15.4 радіоприймачі за допомогою протоколу CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance). На практиці це призводить до випадкового часу зупинки зв'язку для кожного вузла, що стикається, обмеженого тривалістю суперкадру протоколу. У якості вибору архітектури зв'язку БПЛА виявляє положення вузлів наземних датчиків на етапі ініціалізації. Додаткові дані приймаються БПЛА разом із одноадресним повідомленням, яке включає адресу RIME, значення RSSI, значення LQI.

Алгоритм 2. Потік трансляції для виявлення БПЛА-БСМ (псевдокод).

- (1) визначити потік процесу Broadcast {
- (2) почати процес;
- (3) встановити ширококомовне з'єднання;
- (4) while (UAV is in survey_ON) do
- (5) Wait (time);
- (6) підготувати пакет даних;
- (7) відправити ширококомовне повідомлення;
- (8) оновити позицію останньої трансляції;
- (9) while end
- (10) завершити процес;
- (11) }

Далі ми розглянемо підпрограму, яка викликається, коли вузол БПЛА отримує одноадресне повідомлення від вузлів датчиків. Спочатку алгоритм (алгоритм 3) вирішує, чи був він уже включений до списку вузлів чи ні. Якщо адреса RIME відправника не знайдена у списку, створюється новий запис, а поля структури вузла ініціалізуються поточною інформацією. В іншому випадку, якщо адреса вузла відповідає позиції в списку, необхідні значення оновлюються таким чином:

(а) оновлюється енергетичний рівень;

(б) Значення LQI_Min оновлюється, якщо поточне значення нижче за збережене;

Якщо збережений порядковий номер t дорівнює поточному порядковому номеру ширококомовної передачі, значення RSSI_MAX оновлюється, якщо поточне значення більше за старе та якщо параметр U_i збільшується. Якщо t відрізняється, то виконується порівняння RSSI. Якщо поточне значення RSSI перевищує збережене значення RSSI_MAX, порядковий номер t оновлюється, а значення параметра U_i призначається 1. RSSI також оновлюється. З іншого боку, якщо RSSI нижчий, оновлюється лише параметр U_i .

Алгоритм 3. Одноадресне повідомлення БПЛА, отримане від функції сенсорного вузла (псевдокод).

- (1) визначити unicast_received(msg, from){
- (2) для (кожного вузла i у списку) зробити
- (3) якщо ($i.addr$ і $from.addr$ рівні), то
- (4) оновити значення вузла i
- (5) $i.last_E = msg.E$;
- (6) if (current_t = it) then
- (7) if ($i.RSSI_MAX < msg.RSSI$) then
- (8) $i.RSSI_MAX = msg.RSSI$;
- (9) закінчення якщо;
- (10) $iU = U + 1$;
- (11) else
- (12) if ($i.RSSI_MAX < msg.RSSI$) then
- (13) $i.RSSI_MAX = msg.RSSI$;
- (14) $t = \text{номер_порядку}$;
- (15) $iU = 1$;
- (16) end if
- (17) if ($i.LQI_MIN > msg.LQI$) then

```

(18) i.LQI_MIN = msg.LQI;
(19)         end if
(20)     end for
(21)     if (node address from.addr (i==NULL)) then
(22) add node to the list;
(23) ініціалізувати поля вузла;
(24)     end if
(25) }

```

Аналіз отриманих даних починається з поділу списку вузлів датчиків на основі діапазонів, які з'являються в порядковому номері t . Інтервали таких послідовностей вибираються з урахуванням розміру мережі. Голова кластера обирається для кожної групи сенсорних вузлів[10]. Метод виборів складається з бальної системи з різними вагами для показників вибору.

У цьому процесі використовується комбінована вага S_i для кожного $U_i \in M_{t_j}$ $i \in \{1, \dots, n\}$, де M_{t_j} – множина сенсорних вузлів із значенням послідовності t_j , де $t_i \in \{t, \dots, t+m\}$ і m також вибирається відповідно до розміру мережі. Це вибрано емпірично, щоб включити в процес виявлення вузлів мінімальну кількість наземних вузлів для кожного екземпляра трансляції, що транслюється БПЛА. Кількість послідовностей m обернено пропорційна щільності розгортання мережі наземних датчиків. S_i визначається як показано в (2.1):

$$S_i = \omega_1 \cdot B_i + \omega_2 \cdot |RSSI_MAX_i| + \omega_3 \cdot E_i + \omega_4 \cdot 1/LQI_MIN_i \quad (2.1)$$

де $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ є ваговими коефіцієнтами для кожного індикатора, а B_i є двійковим параметром, пов'язаним із датчиком U_i , який приймає значення «1», якщо датчик відповів на БПЛА, і «0» в іншому випадку.

У поточних експериментах використовувалося більше значення для ω для RSSI та рівнів енергії вузлів, але механізм є гнучким, щоб дозволити динамічну

реконфігурацію оцінки голови кластера. Голови кластера обираються для кожного M_{ij} шляхом вибору вузла датчика з максимальним значенням S_i .

2.2 Механізм кластеризації БСМ.

Кластеризація є відповідною технологією маршрутизації для великомасштабних систем моніторингу, яка має низку переваг, таких як масштабованість, конвергенція даних, менше навантаження, низьке енергоспоживання, надійність [26]. Алгоритм кластеризації WSN, описаний у цьому документі, заснований на передумові, що кілька вузлів датчиків були обрані та проінформовані вузлом БПЛА про їх головну роль кластера. Таким чином, рисунок 2.3 ілюструє спрощену послідовність кластеризації. Механізм кластеризації базується на комунікаційному стеку RIME та обміні широкомовними та одноадресними повідомленнями між сусідніми вузлами у випадковому порядку.

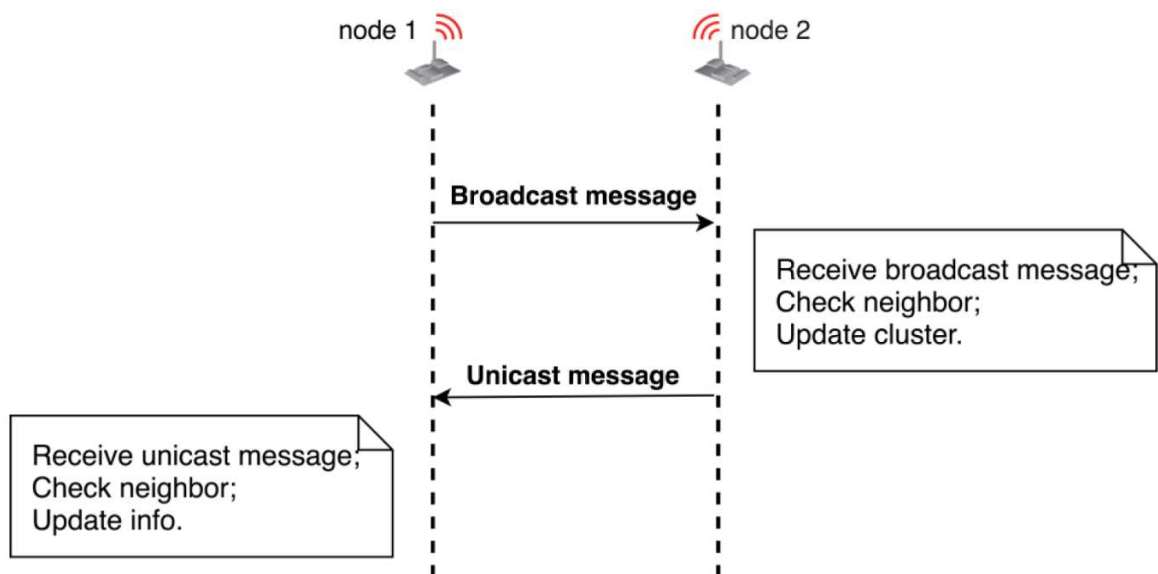


Рисунок 2.3 – Послідовність кластеризації

Кожен вузол випадковим чином транслює повідомлення, що містить його унікальну адресу RIME, поточне членство в кластері, його роль у кластері (ГК або проста) і приблизну кількість членів кластера. Це показано в Алгоритмі 4.

Коли сусідній вузол отримує ширококомове повідомлення, він спочатку перевіряє, чи є вузол-відправник у його списку сусідів. Якщо він не знайдений, то він буде негайно доданий. Після цього він перевіряє інформацію про відправника та вирішує, приєднуватися чи ні до сусідньої групи. Це рішення приймається залежно від кількості стрибків до ГК, оціненої потужності сигналу (RSSI) та інших критеріїв. Це показано в Алгоритмі 5.

Алгоритм 4 . Процес ініціації широкомовного повідомлення для фази кластеризації (псевдокод).

Вхід: clusterSize, cluster, isCH, hopsToCH

Вихід: Broadcast_msg, seqNo

- (1) увімкнути функцію зворотного виклику Broadcast Broadcast_Recv
- (2) while (clusterSize < limit) do
- (3) генерувати random_time;
- (4) очікування (random_time);
- (5) msg.seqNo $\leftarrow$ seqNo;
- (6) msg.cluster $\leftarrow$ кластер;
- (7) msg.isCH $\leftarrow$ isCH;
- (8) msg.hopsToCH $\leftarrow$ hopsToCH;
- (9) завантажити повідомлення;
- (10) надіслати Broadcast(msg);
- (11) end while

Вузол вирішує приєднатися до кластера відправника, виходячи з основних наступних правил: вузол ще не пов'язаний з кластером; вузол належить до іншого кластеру, але кількість переходів до ГК менша або кількість переходів однакова, але RSSI вище.

Після прийняття рішення вузол інформує відправника, чи приєднався він до кластера, щоб обидва могли оновити кількість вузлів усередині кластера.

Алгоритм 5. Процес отримання широкомовного повідомлення для фази кластеризації (псевдокод).

Вхід : msg, cluster, isCH, hopsToCH, clusterSize, CH_RSSI

Вихід : Unicast_msg, cluster, isCH, hopsToCH, clusterSize

(1) Якщо відправника визначено у списку сусідів,

слід оновити дані сусіднього вузла

node.cluster $\leftarrow$ msg.cluster;

node.isCH $\leftarrow$ msg.isCH;

node.hopsToCH $\leftarrow$ msg.hopsToCH;

вузол.RSSI $\leftarrow$ макс.(RSSI);

(2) Інакше додати нового сусіда до списку

ініціалізувати нові сусідні дані

node.cluster $\leftarrow$ msg.cluster;

node.isCH $\leftarrow$ msg.isCH;

node.hopsToCH $\leftarrow$ msg.hopsToCH;

вузол.RSSI $\leftarrow$ msg.RSSI;

(3) Якщо cluster = 0 або node.cluster $\neq$ кластер , то

(4) Якщо (node.isCH = 1 і isCH $\neq$ 1) тоді

(5) Якщо cluster = 0 або (cluster $\neq$ 0 і hops = 0 і node.RSSI > CH_RSSI),

then

cluster $\leftarrow$ node.cluster;

hops $\leftarrow$ 0;

CH_RSSI $\leftarrow$ node.RSSI;

clusterSize $\leftarrow$ node.clusterSize + 1;

(10) Якщо (node.isCH $\neq$ 1 і isCH $\neq$ 1) тоді

(11) Якщо (hops > 1 і hops > node.hops + 1) або (hops = 0 і cluster = 0
і node.cluster $\neq$ 0) потім

cluste $\leftarrow$ node.cluster;

hops $\leftarrow$ node.hops + 1;

clusterSize $\leftarrow$ clusterSize + 1;

else

розмір кластера $\leftarrow \sum_{i=1}^{N_j} clusterSize / N_j$, де N_j це кількість сусідів, які належать до того ж кластера, що й вузол датчика.

(12) $msg.clusterSize \leftarrow clusterSize$;

$msg.cluster \leftarrow$ кластер;

завантажити повідомлення;

надіслати $Unicast(msg)$;

Після отримання одноадресного повідомлення вузол перевіряє, чи включено відправника до списку сусідів, і оновлює або додає інформацію про відправника. Наступним кроком є оновлення інформації про розмір кластера. Ця процедура описана в Алгоритмі 6. Слід зауважити, що інформація про розмір кластера обчислюється лише приблизно за допомогою середньої консенсусної оцінки. Середня консенсусна оцінка стосується того факту, що кожен вузол у кластері оновлює своє локальне значення розміру кластера на основі значень, повідомлених його відомими сусідами. Це відбувається без існування центральної сутності, яка поширює це значення по всій мережі, але за допомогою розподіленого процесу обміну повідомленнями між сусідами. Розміри кластерів можуть змінюватися під час розгортання мережі, оскільки вузли можуть стати недоступними або БПЛА може повторно розпочати процес призначення ГК.

Алгоритм 6. Обробка одноадресних повідомлень функцією БПЛА (псевдокод).

Вхід : $msg, clusterSize, cluster$

Вихід : $clusterSize$

(1) Якщо відправника визначено в списку сусідів,
оновіть дані сусіднього вузла

$node.cluster \leftarrow msg.cluster$;

$node.clusterSize \leftarrow msg.clusterSize$;

(2) Інакше додати нового сусіда до списку
ініціалізувати нові сусідні дані

node.cluster $\leftarrow$ msg.cluster;

node.clusterSize $\leftarrow$ msg.clusterSize;

(3) Розмір кластера $\leftarrow \sum_{i=0}^{N_j} clusterSize/N_j$, де N_j це кількість сусідів, які належать до того ж кластера, що й вузол сенсора.

2.3 Дизайн траєкторії для збору даних.

Для подальшого використання слід повторити деякі з основних понять параметризації В-сплайнів [27]. В-сплайн порядку d описується такими рекурентними співвідношеннями (2.2) і (2.3):

$$B_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } \tau_i \leq t < \tau_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2.2)$$

$$B_{i,d}(t) = \frac{t - \tau_i}{\tau_{i+d-1} - \tau_i} B_{i,d-1}(t) + \frac{\tau_{i+d} - t}{\tau_{i+d} - \tau_{i+1}} B_{i+1,d-1}(t) \quad (2.3)$$

для $d > 1$, $i = 0, 1 \dots n = m - d$ і незменшуючих моментів часу (2.4)

$$\mathbb{T} = \{\tau_0 \leq \tau_1 \leq \dots \leq \tau_m\} \quad (2.4)$$

утворюючи так званий вузол-вектор .

Збір контрольних точок (2.5)

$$\mathbb{P} = \{p_0, p_1 \dots p_n\} \quad (2.5)$$

описуємо криву В-сплайна як лінійну комбінацію контрольних точок (2.5) і функцій В-сплайна (2.2), (2.3) як (2.6):

$$z(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,d}(t) P_i = \mathbf{P} \mathbf{B}_d(t) \quad (2.6)$$

$${}_3\mathbf{P} = [p_0 \dots p_n] ; \mathbf{B}_d(t) = [B_{0,d} \dots B_{n,d}(t)]^T.$$

Використовуючи (2.6), ми можемо виразити входи та стани динаміки БПЛА через вихід $z(t)$ та його похідні (2.7):

$$\begin{aligned} x(t) &= \Theta(z(t), \dot{z}(t), \dots, z^{(q)}(t)) = \tilde{\Theta}(\mathbf{P}, \mathbf{B}_d(t)), \\ u(t) &= \Phi(z(t), \dot{z}(t), \dots, z^{(q+1)}(t)) = \tilde{\Phi}(\mathbf{P}, \mathbf{B}_d(t)) \end{aligned} \quad (2.7)$$

де q максимальний порядок похідних для $z(t)$ і де відображення $\tilde{\Theta}(\cdot, \cdot)$, $\tilde{\Phi}(\cdot, \cdot)$ виражає стани та входи через контрольні точки $\mathbf{P}$ і В-сплайни $\mathbf{B}_d(t)$.

Основна складність місії полягає в тому, щоб ефективно охопити ГК датчиків, щоб отримати всю інформацію, яку вони надають. Слід зауважити, що ця вимога вимагає не тільки проходити поблизу ГК, але й залишатися достатньо часу в межах їхнього діапазону зв'язку (наприклад, для отримання даних).

Класична параметризація В-сплайнів дозволяє проходити через (або в межах заздалегідь визначеної околиці) шляхову точку (положення цікавої ГК). Дві головні проблеми полягають у тому, що як загальний час для траєкторії, так і проміжні моменти, коли датчик проходить поблизу шляхових точок, мають бути задані апріорі. Тут ми зосереджуємося на другому питанні, але також згадуємо деякі евристики для першого.

По-перше, розглядаємо ітераційну схему, де для фіксованих точок шляху та заданого інтервалу допустимої швидкості ми оцінюємо загальний час для траєкторії БПЛА. По-друге, спираючись на деяку попередню роботу, виконану в [26], ми гарантуємо, що БПЛА проводить достатньо часу в радіусі зв'язку кожної ГК.

Як правило, розглядається набір із $N + 1$ точок шляху з пов'язаними мітками часу (2.8):

$$\mathbb{W} = \{w_k\} \text{ and } \mathbb{T}_{\mathbb{W}} = \{t_k\}. \quad (2.8)$$

Потім БПЛА повинен пройти через кожен точку шляху w_k у заздалегідь визначеному місці t_k , тобто $y(t_k) = w_k$ (де $y(t)$ є позиційною складовою стану БПЛА). Ці обмеження точки маршруту є непотрібно обмежувальними і, як наслідок, негативно впливають на процедуру генерації траєкторії (навіть роблячи всю процедуру нездійсненною).

Попередні результати [26] частково пом'якшують ці обмеження, по-перше, пом'якшуючи просторове обмеження (положення БПЛА має залишатися в околицях точки шляху), а по-друге, послаблюючи часові обмеження (час, за який БПЛА проходить через область відсотки не фіксуються априорі).

Зв'яжемо з кожною точкою шляху комунікаційну область $S_k \subset \mathbb{R}^{n_x}$ (ми вважаємо цю область багатогранною множиною). Тоді включення (2.9):

$$\tilde{\Theta}(B_d(t), P) \in \{w_k\} \oplus S_k, \forall t \in [t_k^-, t_k^+], \forall k = 0 \dots N, \quad (2.9)$$

означає, що траєкторія витрачає достатньо часу (в інтервалі $[t_k^-, t_k^+]$, такий, що $t_k^+ - t_k^- \geq t_{min}$ з t_{min} априорно фіксований мінімальний інтервал часу) поблизу кожної з його ГК (характеризується положенням w_k і комунікаційний регіон S_k).

Умова (11) є непрактичною, оскільки вимагає перевірки траєкторії протягом безперервного інтервалу часу (тобто $t \in [t_k^-, t_k^+]$). Щоб вирішити цю проблему, ми розглядаємо вибірку часового інтервалу шляхом вибору $\{t_0 \leq \tilde{t}_0, \dots, \tilde{t}_{\tilde{N}}\} \subset [t_0, t_N]$.

Вибір інтервалу часу вибірки $(\tilde{t}_{k+1} - \tilde{t}_k)$ є важливою передумовою: надто великий крок робить формулювання проблеми занадто жорстким, а надто малий безпідставно збільшує обчислювальну складність. Для відповідного вибору обидва розміри областей чутливості S_k і необхідно враховувати обмеження швидкості БПЛА.

2.4 Висновки по другому розділу

У цьому розділі розглянуто алгоритми для виявлення та кластеризації безпроводних сенсорних мереж (БСМ), механізми кластеризації та особливості проектування траєкторій для збору даних. На основі проведеного аналізу сформульовано такі висновки:

1. Алгоритми виявлення та кластеризації мережі є ключовими компонентами для забезпечення ефективної роботи БСМ. Виявлення вузлів дозволяє визначити структуру мережі та оцінити її поточний стан, а кластеризація забезпечує оптимальне використання ресурсів мережі, зменшуючи навантаження на окремі вузли та підвищуючи енергоефективність.
2. Механізм кластеризації БСМ передбачає поділ мережі на кластери з вибором головних вузлів (cluster heads), які координують збір і передачу даних у межах кожного кластеру. Ефективність цього процесу залежить від таких факторів, як відстань між вузлами, рівень заряду їхніх батарей та кількість доступних ресурсів. Розроблений механізм кластеризації враховує ці фактори, що дозволяє досягти збалансованого навантаження між вузлами і подовжити термін служби мережі.
3. Дизайн траєкторії для збору даних є важливим етапом оптимізації роботи системи збору інформації. Використання мобільних агрегаторів даних, таких як БПЛА, вимагає розроблення оптимальних маршрутів польоту, які забезпечують мінімальну тривалість збору даних і зменшення витрат енергії. Аналіз показує, що підходи на основі алгоритмів комівояжера, зонального покриття та евристичних методів забезпечують ефективну побудову траєкторій, особливо в умовах великої кількості сенсорних вузлів.

Таким чином, ефективне проектування алгоритмів виявлення, кластеризації та планування траєкторій збору даних є ключовими складовими для підвищення

продуктивності й надійності роботи систем на базі БСМ та БПЛА. Впровадження цих рішень дозволяє значно скоротити енергозатрати, підвищити швидкість збору даних і забезпечити стабільну роботу мережі у складних умовах.

3. СИМУЛЯЦІЯ РОБОТИ СИСТЕМИ БПЛА-БСМ

3.1 Оцінка розташування сенсора та планування траєкторії

Для проведення даної роботи доцільно розглянути її на прикладі раніше введеного середовища з попереднього розділу, тобто середовище з кількома перешкодами та випадково розташованими сенсорами. А також доцільно застосувати попередні теоретичні результати, щоб дати як оцінку розташування, так і створити траєкторію, яка ефективно проходить (з мінімальною довжиною) поблизу ГК і, в той же час, уникає перешкод.

Щоб підкреслити процедуру оцінки розташування датчиків, на рисунку 3.1 ми проілюструємо результати оцінки для вибору параметрів $\Delta = 100$ м, $\delta = 50$ м і $r_j = 150$ м, $\forall j$. Згадуючи побудову невизначеної області з попереднього розділу, діємо так: у кожній точці (позначеній “х” символи на рисунку 3.1) вздовж траєкторії, де проводяться вимірювання, БПЛА збирає інформацію від сенсорів і, використовуючи своє поточне положення та радіус зв’язку $r_j = 150$ м забезпечує невизначений регіон $\widehat{Z}_j$ для кожного з датчиків, як у співвідношенні (1).

Як видно на рисунку 3.1, реальне положення сенсора (позначене кружками з синьою заливкою) знаходиться всередині невизначених областей з жовтою заливкою (1). Вони, у свою чергу, надмірно наближені, як показано в процедурі оптимізації (2), через кола (фігури з червоною заливкою), що характеризуються центрами c_j (порожністі сині кола) і радіуси r_j' .

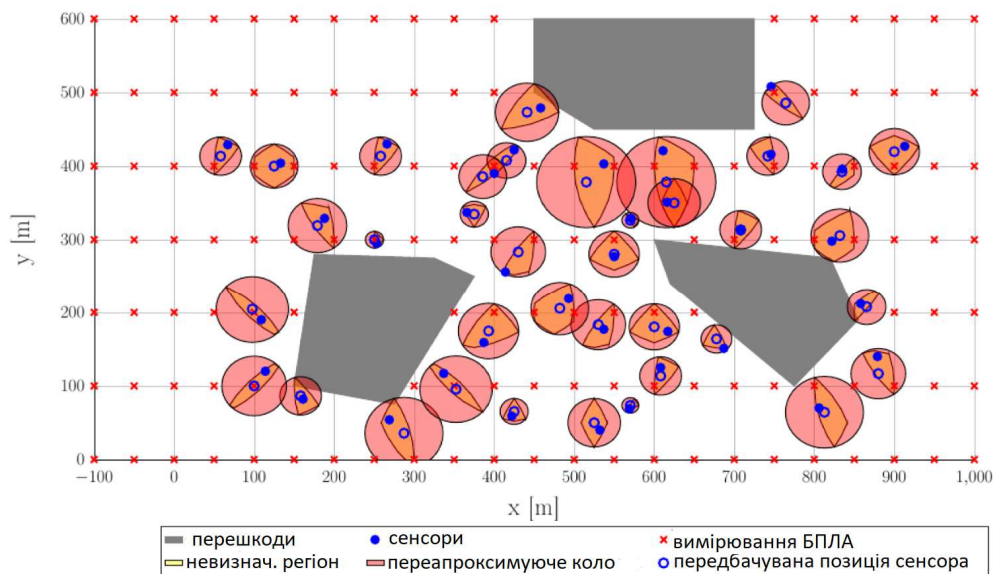


Рисунок 3.1 - Оцінка розташування сенсора як в точному, так і в наближеному варіантах

Слід звернути увагу, що припущення про відомий радіус зв'язку призводить до обмеженої невизначеності: хоча фактичне положення сенсора невідоме, воно, тим не менш, гарантовано лежить у межах невизначеної області (1).

Для цього конкретного прикладу спостерігаємо, що радіуси невизначеності r'_j залишитися в інтервалі $[10,51 \text{ м}, 61,97 \text{ м}]$. З найгіршої оцінки, $r'_j = 61,97 \text{ м}$ значно менше радіусу зв'язку $r_j = 150 \text{ м}$ тому можна вважати процедуру ідентифікації досить точною. Також слід зауважити, що гірші невизначеності для датчиків поблизу перешкод. Це відбувається тому, що згідно припущення, над забороненими областями не проводяться вимірювання, що означає, що є менше можливостей оцінити положення сенсорів.

Зауважте для подальшого використання, що гарантована область зв'язку задана колом із центром c_j з радіусом $\hat{r}_j = r_j - r'_j$. Це дозволяє пізніше розглядати сенсори так, ніби вони розташовані в центрі c_j з радіусом $\hat{r}_j$ з точки зору подальших процедур формування траєкторії. «Найгірші» або «найкращі» оцінки отримані пізніше: після того, як БПЛА здійснить свій початковий проліт, ми переходимо до обмеження фактичного положення датчиків через пов'язані з ними невизначені області (1) і згодом надмірно наближені їх колами радіуси r'_j . Якщо апроксимація

незадовільна (наприклад, r_j' за розміром порівнянна з радіусом зв'язку r_j) то потрібно повторити процедуру зі зміненими параметрами (менший міжрядковий Δ , і міжрядкові інтервали δ).

На рисунку 3.2 показані різні траєкторії, що проходять через або поблизу ГК. Ці траєкторії отримують відповідно до процедури, описаної в попередньому розділі. Коротко: ми припускаємо, що кожна траєкторія є зваженою сумою базисних функцій (у нашому випадку В-сплайнів, визначених у (4)–(6)), ваги яких є результатом процедури оптимізації з обмеженнями (вартістю є загальна траєкторія довжини, а обмеження взято з (7)–(11)). Ми перераховуємо їх у порядку зростання складності: (i) пунктирна синя крива описує траєкторію, яка проходить через голови кластерів (великі чорні крапки), ігноруючи перешкоди; (ii) пунктирна зелена крива показує трохи складніший випадок, коли потрібно, щоб траєкторія проходила крізь околиці голови кластера (тобто знаходилася всередині радіуса зв'язку — напівпрозорі червоні області), все ще ігноруючи перешкоди; (iii) пурпурова суцільна крива показує траєкторію, яка забезпечує як достатнє обмеження часу зв'язку, так і обмеження уникнення перешкод.

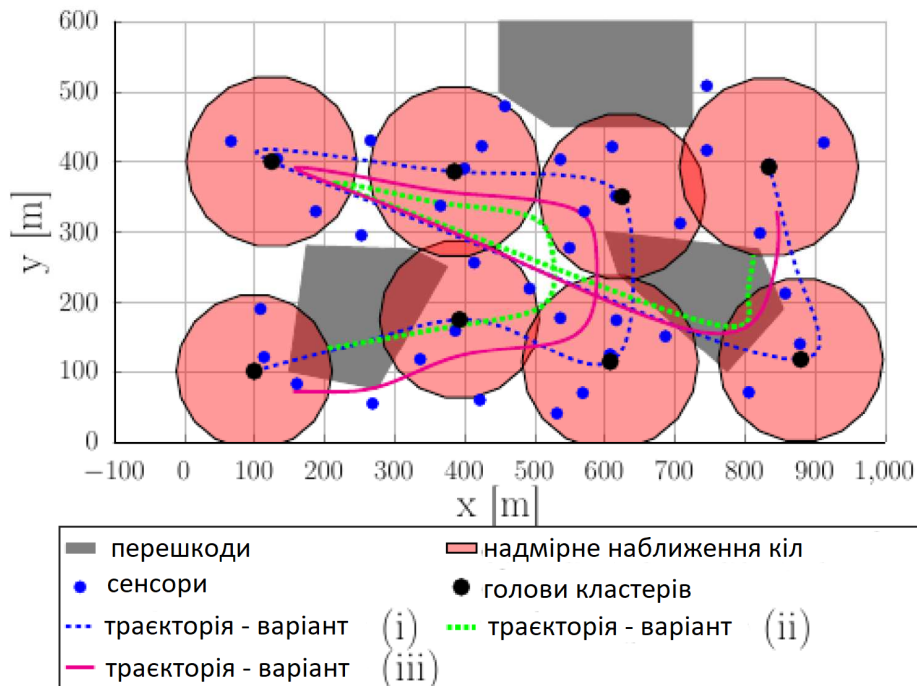


Рисунок 3.2 - Обчислені траєкторії, що проходять через або поблизу голів кластерів: сірі області — перешкоди, напівпрозорі червоні області — зони зв'язку

В обох випадках на задньому плані знаходяться перешкоди (області, заповнені сірим), датчики (блакитні крапки) і голови кластерів (позначені їх передбачуваним положенням — великі чорні крапки та передбачуваний радіус зв'язку — напівпрозорі червоні області).

3.2 Симуляція роботи БСМ та кластеризація

Для перевірки алгоритмів та працездатності системи доцільно провести симуляцію її роботи, що дозволить відтестувати різні алгоритми перед їх впровадженням в реальні пристрої. Одним з таких популярних засобів є Contiki OS та COOJA network simulator.

Contiki OS є ефективною операційною системою для роботи з безпроводними сенсорними мережами, що забезпечує підтримку сучасних протоколів, таких як IPv6 через 6LoWPAN, і відзначається низькими вимогами до ресурсів. Вона дозволяє створювати енергоефективні мережі та реалізовувати складні алгоритми, зокрема для кластеризації мережі та вибору головних вузлів (cluster heads). Завдяки модульній архітектурі Contiki OS, користувачі можуть адаптувати її під конкретні завдання, оптимізуючи роботу сенсорних вузлів.

COOJA network simulator є універсальним інструментом для моделювання та тестування сенсорних мереж, який дозволяє розробникам і дослідникам візуалізувати та аналізувати роботу мережі у реальному часі. Симулятор підтримує роботу з реальним кодом Contiki OS, що забезпечує точність тестування й полегшує перехід до фізичного розгортання мережі. Однією з ключових переваг COOJA є можливість моделювати як логічну роботу вузлів, так і їхню апаратну взаємодію, враховуючи реальні радіозавадові умови.

Для кластерних мереж COOJA дозволяє експериментувати з різними алгоритмами вибору головних вузлів, оцінюючи їхню ефективність за параметрами енергоспоживання, надійності передачі даних і балансу навантаження. Це дає

змогу виявити оптимальні підходи до кластеризації ще на етапі проектування. Крім того, симулятор надає можливість масштабувати мережу до сотень вузлів, оцінюючи її продуктивність і стійкість до відмов вузлів. Завдяки таким функціям Contiki OS у поєднанні з COOJA є ідеальним інструментом для дослідження й оптимізації розподілених сенсорних мереж. На рисунку 3.3 наведено приклад симуляції в даному програмному засобі.

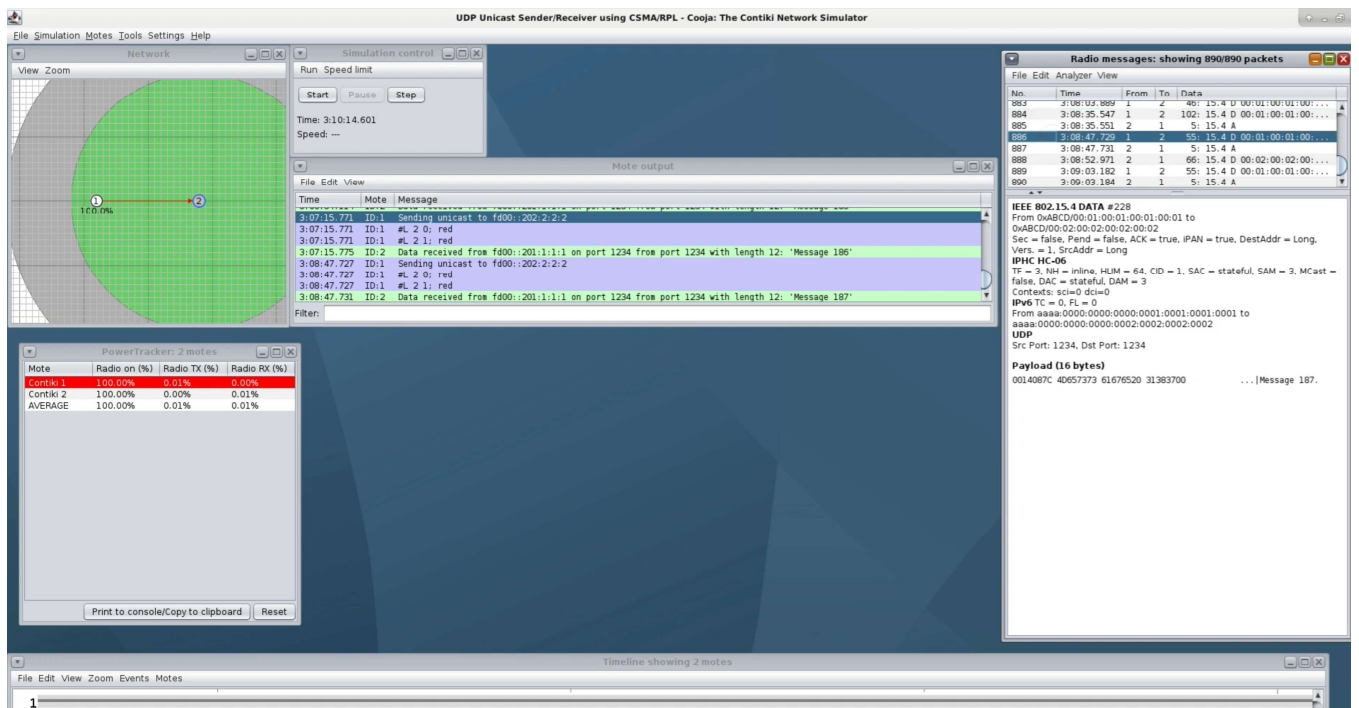


Рисунок 3.3 – Головне вікно COOJA network simulator

Існує декілька операційних систем та інструментів для роботи з безпроводними сенсорними мережами, які можуть виступати аналогами Contiki OS та COOJA.

1. TinyOS

Переваги:

- Дуже легка та енергоефективна ОС, розроблена спеціально для сенсорних мереж.
- Використовує компонентний підхід, що дозволяє розробляти модульні додатки.

- Має активну спільноту розробників і багато бібліотек.
- Підтримує велику кількість платформ для сенсорів.

Недоліки:

- Використовує специфічну мову програмування NesC, яка складна для вивчення.
- Обмежена підтримка сучасних протоколів, таких як IPv6.
- Відсутність гнучкого і зручного інструменту для моделювання (аналогів COOJA).

2. RIOT OS

Переваги:

- Підтримує багатопотоковість, що відсутнє в Contiki OS і TinyOS.
- Сумісна з багатьма платформами (включаючи ARM, x86, MSP430).
- Має сучасний дизайн і підтримує протоколи IPv6, 6LoWPAN, RPL, CoAP.
- Використовує мову програмування C, що є звичною для багатьох розробників.

Недоліки:

- Вимагає більше ресурсів у порівнянні з Contiki OS.
- Менш поширена і має меншу спільноту користувачів, ніж Contiki OS.
- Інструменти для симуляції мереж не такі потужні, як COOJA.

3. FreeRTOS

Переваги:

- Дуже легка і портативна реального часу ОС для вбудованих систем.
- Підтримує багато архітектур і платформ.
- Добре документована і має велику спільноту.
- Забезпечує високу продуктивність для задач реального часу.

Недоліки:

- Орієнтована більше на вбудовані системи, ніж на сенсорні мережі.

- Відсутня інтегрована підтримка мережесих протоколів 6LoWPAN або RPL.
- Не має спеціалізованих симуляторів для сенсорних мереж.

4. OpenWSN

Переваги:

- Орієнтована на роботу з протоколами IEEE 802.15.4e, 6TiSCH, RPL.
- Створена спеціально для Інтернету речей (IoT).
- Підтримує сучасні стандарти і протоколи для енергоефективних мереж.

Недоліки:

- Вузька спеціалізація: підходить переважно для тестування IoT-протоколів.
- Менша спільнота розробників і менша кількість підтримуваних платформ.
- Складність налаштування та відсутність розвиненого симулятора.

5. NS-3 (Network Simulator 3)

Переваги:

- Потужний інструмент для моделювання мереж будь-якого типу, включаючи сенсорні.
- Підтримує моделювання фізичного рівня та протоколів (TCP/IP, 6LoWPAN, RPL).
- Гнучкість і широкі можливості налаштування симуляцій.

Недоліки:

- Складніший у використанні, ніж COOJA.
- Моделювання відбувається на високому рівні, без інтеграції з реальним кодом ОС (наприклад, Contiki).
- Вимагає більше ресурсів для запуску симуляцій.

6. OMNeT++

Переваги:

- Надзвичайно гнучкий інструмент для моделювання мереж, включаючи IoT і сенсорні мережі.
- Підтримує створення власних моделей протоколів і взаємодії вузлів.
- Забезпечує візуалізацію процесу симуляції у зручному інтерфейсі.

Недоліки:

- Відсутня інтеграція з реальними операційними системами, як у COOJA.
- Більш орієнтований на дослідницькі завдання, ніж на практичну розробку.
- Висока складність налаштування для новачків.

Contiki OS + COOJA добре підходять для симуляції реальних сценаріїв завдяки інтеграції з реальним кодом і гнучкому налаштуванню сенсорних мереж.

TinyOS ефективний для створення легких і енергоефективних мереж, але менш зручний для симуляцій і має складну мову NesC.

RIOT OS забезпечує багатопотоковість і сучасний підхід, але вимагає більше ресурсів.

FreeRTOS оптимальний для реального часу, але не спеціалізується на сенсорних мережах.

NS-3 та OMNeT++ ідеальні для моделювання великих мереж, але вони складніші у використанні й не інтегруються з реальними ОС.

Вибір платформи залежить від завдань: для симуляції кластеризації з реальним кодом краще підходять Contiki OS і COOJA, тоді як для теоретичного аналізу масштабних мереж можна використовувати NS-3 або OMNeT++.

Експерименти базуються на платформах TelosB/Tmote Sky, сумісних з ОС Contiki. Ми скористалися перевагами нових доступних віртуальних інструментів для створення прототипів WSN, середовища моделювання Contiki COOJA. Результати кластеризації отримані шляхом реалізації детермінованого механізму

кластеризації, представленого в попередньому, із призначенням ГК системою БПЛА.

Що стосується вибраних СН, ми уявили шлях навігації по діаграмі вузлів і ми довільно вибрали СН, оскільки вони були б обрані за підтримки БПЛА за допомогою механізму підрахунку балів. На рисунку 3.4 показано кластерний WSN, який містить те саме розгортання, що використовується для оцінки розташування датчиків і обчислення планування траєкторії. Схема розміщення мережі була отримана за результатами моделювання запропонованого механізму кластеризації. Мережа розділена на вісім кластерів розміром від трьох до семи сенсорних вузлів. Голови кластерів обведені синіми лініями.

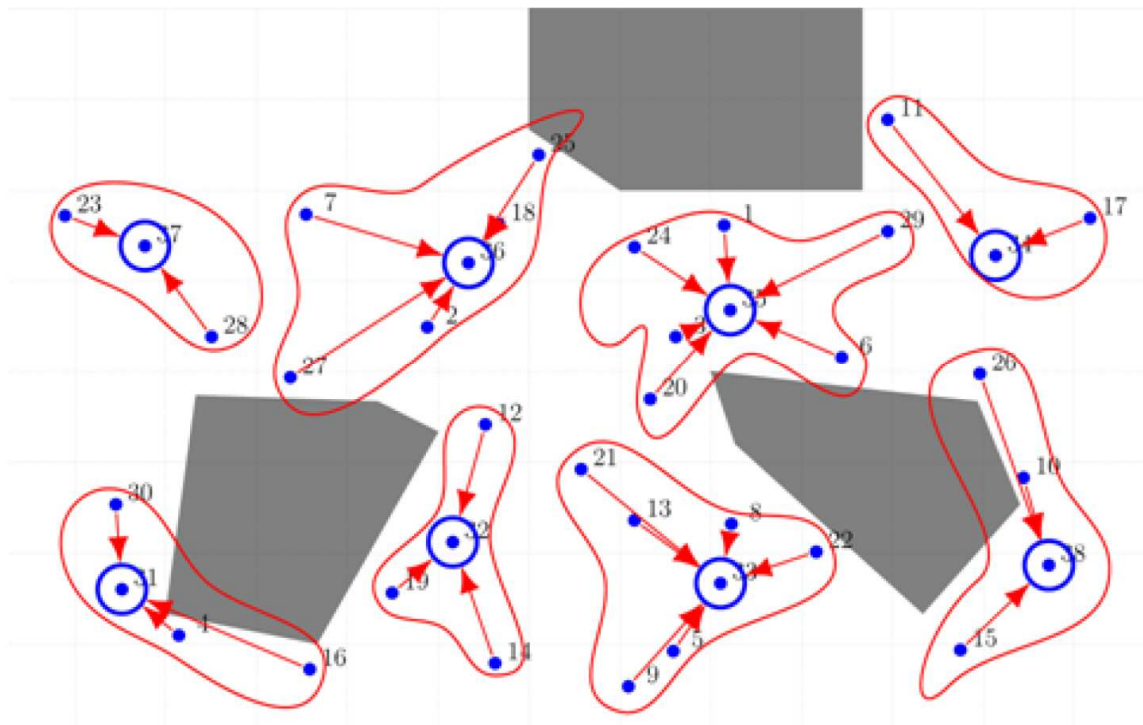


Рисунок 3.4 - Кластерна БСМ — результат моделювання (нормальний і головні сенсори з виділенням кластера)

На додаток до виміряного часу, необхідного для кластеризації БСМ, ми зробили онлайн-оцінку енергоспоживання для кожного вузла датчика за допомогою функції powertrace, доступної для Contiki OS, яка дає нам знати час, проведений у таких станах: ЦП (активний), LPM (режим низької потужності),

передача та прослуховування. Деякі результати моделювання, виконаного на мережах різного розміру, наведено на рисунку 3.4. Значення стандартного відхилення відображає велику варіацію споживання енергії та часу. Це передбачуваний результат через випадковий механізм і нерівномірно розподілену топологію. Середня потужність збільшується з розширенням БСМ, тоді як час, необхідний для механізму кластеризації, не впливає, фактично швидкість кластеризації збільшується, оскільки щільність мережі була збільшена та велика кількість повідомлень обмінювалася одночасно.

Розмір WSN (кількість вузлів)	Потужність (мВт)			Час (с)		
	Максимальна ймовірність	Середнє значення	Стандартне відхилення	Максимальна ймовірність	Середнє значення	Стандартне відхилення
40	18	31.5	12.2	30	30.7	22.7
80	55	61.6	12.7	25	24.1	16.3
100	52	57.8	13.1	20	21.9	13.5

Рисунок 3.4 - Результати статистичного моделювання

3.3 Перевірка роботи методу на тестовому стенді.

Для подальшої оцінки запропонованого рішення для взаємозв'язку БПЛА та наземної БСМ було розроблено кілька реальних реалізацій. Тестові експерименти базуються на платформах TelosB/Tmote Sky, сумісних з ОС Contiki.

Що стосується механізму виявлення БСМ для оцінки положення вузлів датчиків, було створено тестовий стенд, що складається з п'яти вузлів сенсорів, CM3300, який є сумісним з IEEE 802.15.4 вузлом бездротового датчика, розробленим Advanticsys, на основі оригінальної платформи TelosB з відкритим кодом. Основні технічні характеристики CM3300 mote наведені на рисунку 3.5.

Процесор	TI MSP430F1611, 48 КБ флеш-пам'яті програми, 10 КБ пам'яті даних, 1 МБ зовнішньої флеш-пам'яті
ВЧ чіп	TI CC2420, сумісний зі стандартом IEEE 802.15.4 2,4~2,485 ГГц
Чутливість	-95 дБм тип
Швидкість передачі	250 Кбіт/с
РЧ потужність	-25 дБм ~ 20 дБм налаштовується
Діапазон	~800 м (на вулиці), ~100 м (в приміщенні) з антеною 5 дБі
потужність	3 батареї V-2 AA

Рисунок 3.5 - Основні характеристики CM3300

Значення дальності зв'язку поза приміщенням визначаються в ідеальних умовах за допомогою підсилювача потужності та всеспрямованої антени з високим коефіцієнтом посилення. У реальному додатку моніторингу навколишнього середовища, через перешкоди та рослинність, очікується, що це зменшиться в 4-10 разів. Чотири сенсорні вузли були налаштовані, щоб діяти як наземні сенсорні вузли відповідно до описаних алгоритмів. Щоб їх було легше помітити, їх розмістили на дошках жовтого кольору (рисунок 3.7 а). П'ятий був налаштований як вузол БПЛА, і він був включений у корисне навантаження БПЛА (рисунок 3.7 б). Технічні характеристики використовуваного БПЛА — DJI MATRICE 600 PRO наведені на рисунку 3.6.

Розміри	1608 × 1518 × 727 мм ³
вага	9,5 кг
MTOW	15,5 кг
Максимальна швидкість	65 км/год
Автономність	32 хв
Робочий діапазон	5 км
Службова стеля	2500 м

Рисунок 3.6 - Основні характеристики БПЛА DJI Matrice 600 PRO



(a)



(b)

Рисунок 3.7 - Обладнання, що використовується в експериментальному циклі. (а) вузол наземного датчика; (б) БПЛА.

Для цього експерименту було визначено план польоту з висотою 35 м над землею, призначений для дослідження цікавої території площею 3 га. Середня крейсерська швидкість склала 3 м/с, а час польоту – 10:47 хв. Використовуючи наявний запис польоту, згенерували наступну траєкторію польоту, зображену на рисунку 3.8.

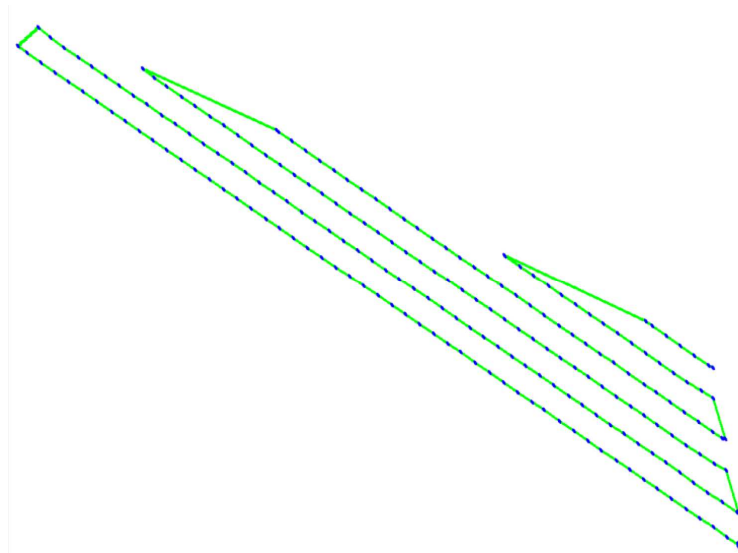


Рисунок 3.8 - Траєкторія польоту для експериментального запуску

Після обробки зареєстрованих даних із вузла БПЛА можна було створити наступні представлення позицій відповіді БСМ (рисунок 3.9). У кожному

представленні сенсорний вузол, який наразі згадується, позначений великою чорною крапкою. Червоні крапки представляють позиції БПЛА, на яких приймаються пакети від поточного сенсора.

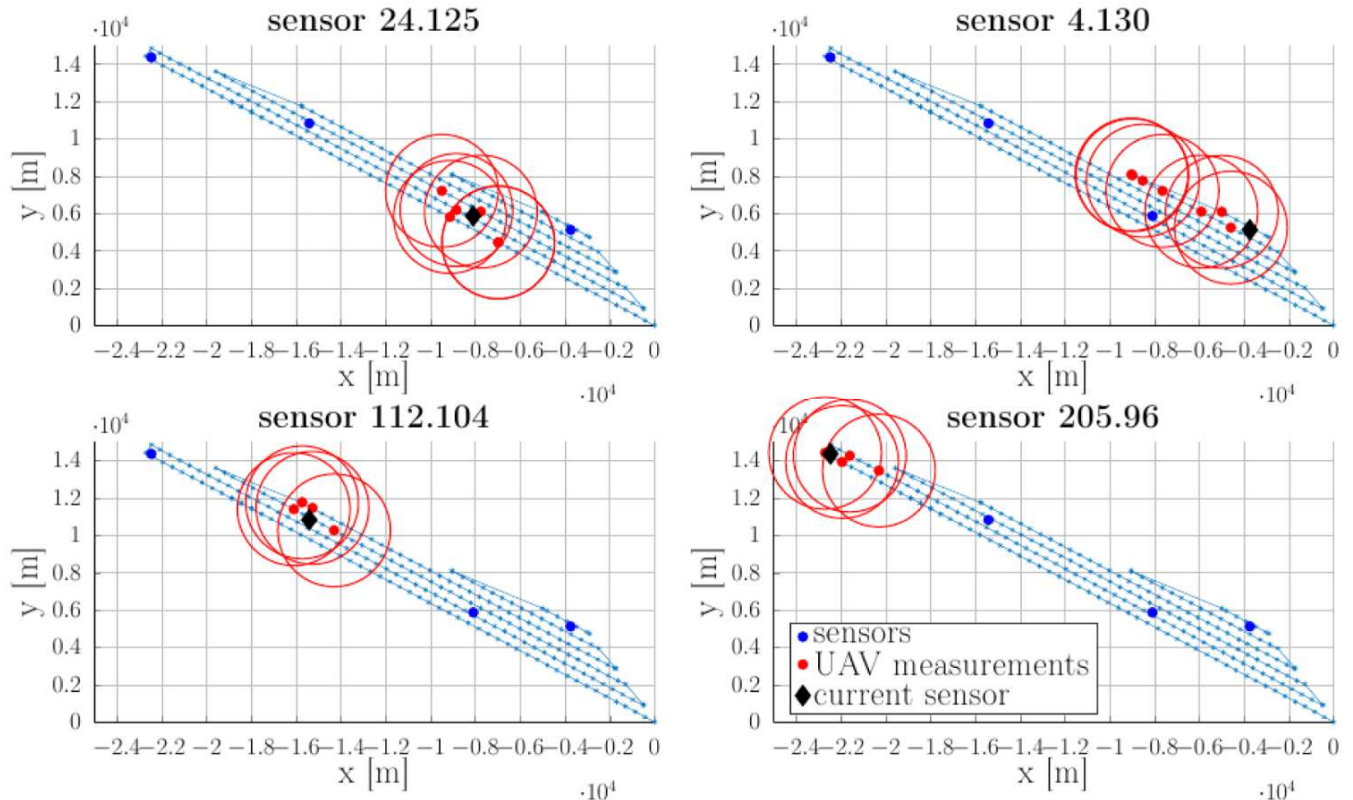


Рисунок 3.9 - Позиції відгуку вузлів сенсорів

Для спрощення представлення були збережені лише відповіді з індикатором сили сигналу вище межі чутливості. Сенсорні вузли однозначно ідентифікуються всередині мережі за допомогою їхніх адрес комунікаційного стеку RIME. Для цього конкретного прикладу ми спостерігаємо, що краще розміщені вузли всередині області, описаної траєкторією польоту (24.125 і 112.104), можуть бути точно оцінені, тоді як вузли, розташовані на кордоні, отримують найгірші оцінки.

Розрахункове розташування сенсорів із надмірним наближенням еліпсоїдних форм показано на рисунку 3.10. Для вузла 4.130, який розташований на краю зони моніторингу, неможливо було визначити передбачувану позицію. Для решти вузлів ми вважаємо процедуру ідентифікації досить точною (невизначений радіус r'_j значно менший за радіус зв'язку r_j).

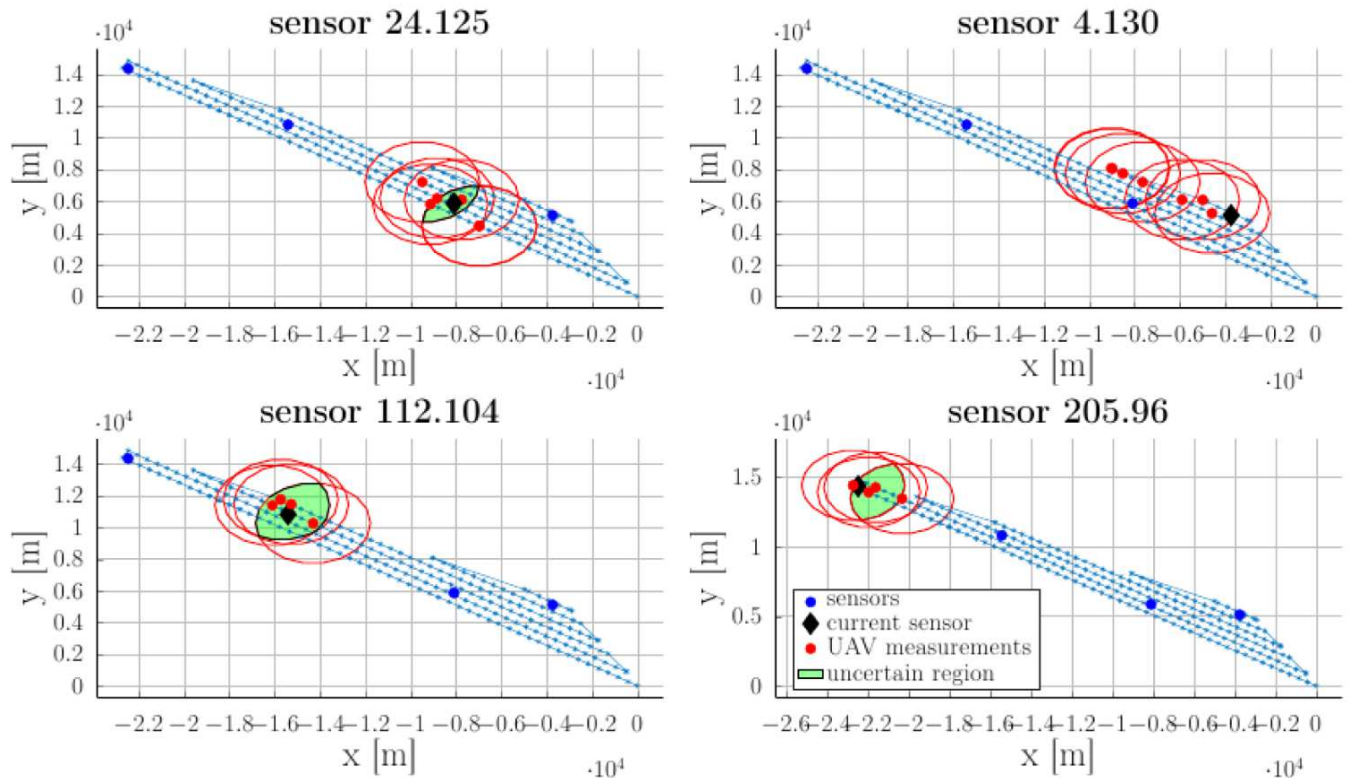


Рисунок 3.10 - Розрахункове розташування датчиків за результатами послідовних вимірювань БПЛА

Мінливість щільності рослинності протягом року, погодні умови та орієнтація антени після неконтрольованого розгортання повітряних відомі як критичні фактори, що впливають на ефективність зв'язку вузла [15, 16]. У нашому сценарії під час експериментального розгортання ми спостерігаємо такі явища для сенсорного вузла 4.130, графічно зображеного на рисунку 3.11, який був розгорнутий на краю поля з навколишньою рослинністю. Цей окремий сенсорний вузол також ілюструє індуковану мінливість через вплив рослинності в продуктивності бездротового зв'язку. Для пом'якшення таких ситуацій може бути реалізований імовірнісний підхід, який встановлює надійні межі значень RSSI та доступності вузлів датчиків. Крім того, області зі зниженим RSSI можна компенсувати збільшенням щільності покриття вузлів, наприклад, збільшенням кількості вузлів у даній області.

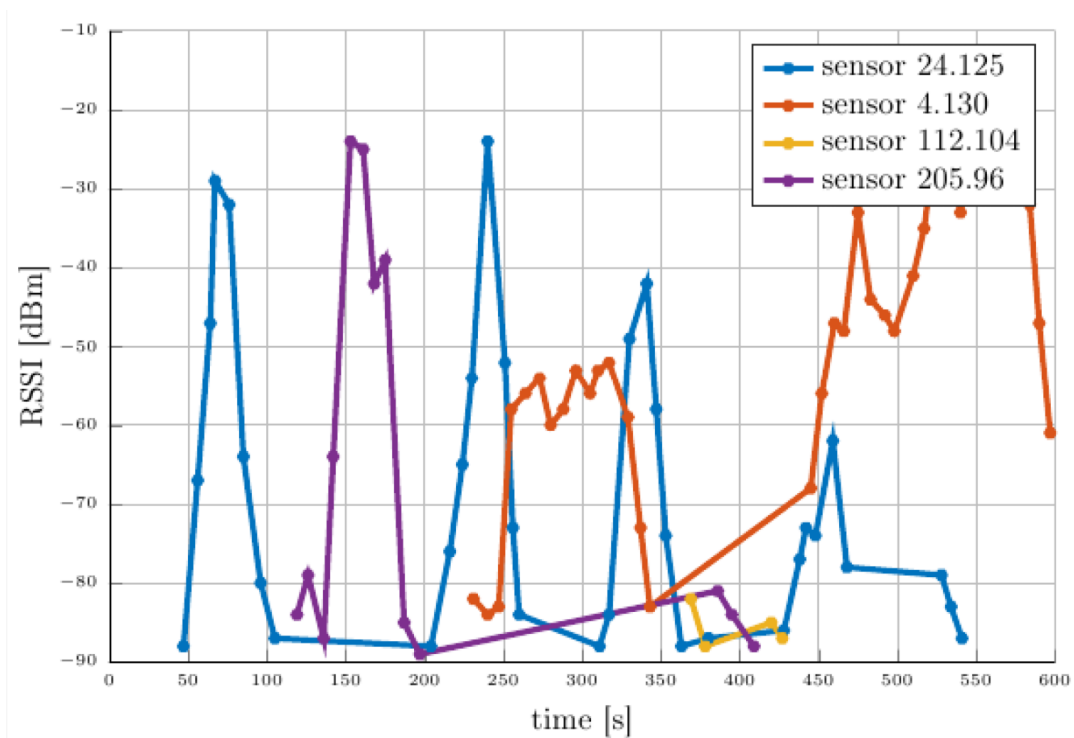


Рисунок 3.11 - RSSI для кожного сенсора під час експерименту

Використовуючи дані, доступні з журналів вузлів БПЛА, ми додатково аналізуємо зміни RSSI, проілюстровані на рисунку 3.11. Можна побачити, як змінюється еволюція RSSI залежно від положення БПЛА.

3.4 Висновки до третього розділу

У цьому розділі виконано оцінку розташування сенсорів у безпроводній сенсорній мережі (BCM), розроблено підходи до планування траєкторій збору даних, проведено симуляцію роботи мережі та перевірено ефективність запропонованого методу на тестовому стенді. На основі виконаної роботи сформульовано такі висновки:

1. Оцінка розташування сенсорів та планування траєкторії дозволила визначити ключові фактори, які впливають на ефективність збору даних. Правильне розміщення сенсорів із врахуванням параметрів покриття та енергетичних ресурсів сприяє підвищенню продуктивності мережі.

Оптимальне планування траєкторії для мобільного агрегатора (БПЛА) забезпечує зменшення загального часу збору даних та мінімізацію витрат енергії, що є критично важливим для задач моніторингу у віддалених або складнодоступних місцях.

2. Симуляція роботи БСМ та кластеризації за допомогою програмного забезпечення (наприклад, COOJA) дозволила оцінити працездатність і продуктивність мережі на етапі проєктування. Використання алгоритмів кластеризації, таких як LEACH, дозволило зменшити навантаження на вузли та оптимізувати передачу даних у межах мережі. Результати симуляції підтвердили, що розроблені підходи до кластеризації забезпечують підвищення енергоефективності мережі та збалансованість роботи її компонентів.
3. Перевірка роботи методу на тестовому стенді продемонструвала можливість реалізації запропонованих алгоритмів в умовах реального середовища. Проведені експерименти підтвердили відповідність результатів симуляцій реальній роботі мережі, зокрема стабільну передачу даних, енергоефективність вузлів та успішне функціонування механізму кластеризації. Запропонований метод показав високу точність збору даних та можливість адаптації до змінних умов навколишнього середовища.

Таким чином, виконане дослідження підтвердило доцільність використання алгоритмів кластеризації та оптимізації траєкторій для мобільних агрегаторів у БСМ. Симуляції та експериментальні випробування дозволили підтвердити ефективність і надійність запропонованого методу, що є основою для його подальшого впровадження у практичних задачах моніторингу та збору даних.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано дослідження, спрямоване на розробку підходів до інтеграції безпроводних сенсорних мереж (БСМ) з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та оптимізацію їх взаємодії для задач збору та аналізу даних. Результати проведеної роботи дозволяють зробити такі загальні висновки:

1. Розподілені сенсорні мережі є універсальними та адаптивними системами, здатними до моніторингу різноманітних об'єктів і середовищ завдяки автономності, масштабованості та економічності. Інтеграція з БПЛА розширює функціональність БСМ, дозволяючи здійснювати оперативний збір даних у важкодоступних зонах і мінімізувати залежність від стаціонарної інфраструктури.

2. Ефективна робота БСМ забезпечується використанням алгоритмів кластеризації та механізмів планування, що сприяють зменшенню енергозатрат і збалансуванню навантаження між вузлами. Розроблені підходи до вибору кластерних голів і маршрутизації даних підвищують надійність та енергоефективність мережі.

3. Планування траєкторій мобільних агрегаторів (БПЛА) є ключовим для мінімізації часу збору даних і витрат енергії. Використання алгоритмів, таких як метод комівояжера та зонального покриття, дозволило досягти оптимального дизайну траєкторій, особливо в умовах великої кількості сенсорних вузлів.

4. Проведені симуляції та експерименти підтвердили ефективність запропонованих методів. Використання алгоритмів кластеризації, таких як LEACH, та оцінка роботи мережі за допомогою програмного забезпечення (наприклад, COOJA) дозволили перевірити їх працездатність і продуктивність у реальних умовах.

5. Результати дослідження демонструють високу перспективність запропонованих рішень для впровадження у практичних задачах моніторингу, зокрема в екології, сільському господарстві та промисловості. Інтеграція БПЛА з

БСМ дозволяє суттєво покращити оперативність, точність і адаптивність систем збору даних.

Таким чином, виконане дослідження створює основу для подальшої розробки й впровадження інноваційних систем моніторингу на базі БСМ та БПЛА, що здатні працювати в складних умовах із високою ефективністю.

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. Алексєєва, 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. Cao, H.; Liu, Y.; Yue, X.; Zhu, W. Cloud-assisted UAV data collection for multiple emerging events in distributed WSNs. *Sensors* 2017, 17, 1818.
 12. Martinez-de Dios, J.R.; Lferd, K.; de San Bernabé, A.; Núñez, G.; Torres-González, A.; Ollero, A. Cooperation between UAS and wireless sensor networks for efficient data collection in large environments. *J. Intell. Robot. Syst.* 2013, 70, 491–508.
 13. Ma, X.; Kacimi, R.; Dhaou, R. Fairness-Aware UAV-Assisted Data Collection in Mobile Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Paphos, Cyprus, 5–9 September 2016; pp. 995–1001.
 14. Liu, J.; Wang, X.; Bai, B.; Dai, H. Age-Optimal Trajectory Planning for UAV-Assisted Data Collection. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Honolulu, HI, USA, 15–19 April 2018; pp. 553–558.

15. Erdelj, M.; Król, M.; Natalizio, E. Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management. *Comput. Netw.* 2017, 124, 72–86.
16. Berrahal, S.; Kim, J.H.; Rekhis, S.; Boudriga, N.; Wilkins, D.; Acevedo, J. Unmanned Aircraft Vehicle Assisted WSN-Based Border Surveillance. In *Proceedings of the 2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Croatia, 16–18 September 2015; pp. 132–137.
17. Pirmagomedov, R.; Kirichek, R.; Blinnikov, M.; Koucheryavy, A. UAV-based gateways for wireless nanosensor networks deployed over large areas. *Comput. Commun.* 2019, 146, 55–62.
18. Ferrer, E.C. The blockchain: A new framework for robotic swarm systems. In *Advances in Intelligent Systems and Computing, Proceedings of the Future Technologies Conference*, Vancouver, BC, Canada, 15–16 November 2018; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 1037–1058.
19. Ebrahimi, D.; Sharafeddine, S.; Ho, P.H.; Assi, C. UAV-aided projection-based compressive data gathering in wireless sensor networks. *IEEE Internet Things J.* 2018, 6, 1893–1905.
20. Gomez, J.M.; Wiedemann, T.; Shutin, D. Unmanned aerial vehicles in wireless sensor networks: Automated sensor deployment and mobile sink nodes. In *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 943–953.
21. Caillouet, C.; Giroire, F.; Razafindralambo, T. Efficient data collection and tracking with flying drones. *Ad Hoc Netw.* 2019, 89, 35–46.
22. Popescu, D.; Dragana, C.; Stoican, F.; Ichim, L.; Stamatescu, G. A collaborative UAV-WSN network for monitoring large areas. *Sensors* 2018, 18, 4202.
23. Wang, X.; Zhou, Q.; Cheng, C.T. A UAV-assisted topology-aware data aggregation protocol in WSN. *Phys. Commun.* 2019, 34, 48–57.

24. Villas, L.A.; Guidoni, D.L.; Maia, G.; Pazzi, R.W.; Ueyama, J.; Loureiro, A.A. An energy efficient joint localization and synchronization solution for wireless sensor networks using unmanned aerial vehicle. *Wirel. Netw.* 2015, 21, 485–498.
25. Gong, J.; Chang, T.H.; Shen, C.; Chen, X. Flight time minimization of UAV for data collection over wireless sensor networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 2018, 36, 1942–1954.
26. Nguyen, H.T.; Nguyen, M.T.; Do, H.T.; Hua, H.T.; Nguyen, C.V. DRL-Based Intelligent Resource Allocation for Diverse QoS in 5G and toward 6G Vehicular Networks: A Comprehensive Survey. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2021, 2021, 1–21.
27. Liu, S.; Wei, Z.; Guo, Z.; Yuan, X.; Feng, Z. Performance Analysis of UAVs Assisted Data Collection in Wireless Sensor Network. In *Proceedings of the 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, Portugal, 3–6 June 2018; pp. 1–5.
28. Wang, Z.; Liu, R.; Liu, Q.; Thompson, J.S.; Kadoch, M. Energy-efficient data collection and device positioning in UAV-assisted IoT. *IEEE Internet Things J.* 2019, 7, 1122–1139.
29. Poudel, S.; Moh, S. Energy-Efficient and fast MAC protocol in UAV-Aided wireless sensor networks for Time-Critical applications. *Sensors* 2020, 20, 2635.