

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Метод самовідновлення високомобільної
комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-22-6
Афанасьєва А.М.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Ткачов В.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

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

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

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Афанасьєвій Анні Миколаївні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Метод самовідновлення високомобільної комп'ютерної мережі
на базі рою БПЛА _____

затверджена наказом по університету від “ 01 ” _____ квітня _____ 2024 р. № _____ 257 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 червня 2024 р. _____

3. Вхідні дані до роботи _____

1) відкрита бібліотека JavaScript React.js;

2) тестовий БПЛА для визначення характеристик;

3) стратегії розгортання БПЛА

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) аналіз проблеми та огляд існуючих рішень

2) огляд інструментів та аналіз існуючих рішень;

3) дослідження роботи програмного забезпечення та проведення модельних експериментів;

4) апробація та рекомендація щодо застосованого методу;

5) висновки.

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

Слайд-презентація – 11 слайдів _____

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд протоколів високомобільних комп'ютерних мереж	02.04.24-08.04.24	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	09.04.24-16.04.24	
3	Вибір інструментальних засобів	17.04.24-22.04.24	
4	Розробка моделей протоколів	23.04.24-06.05.24	
5	Проведення експериментів	07.05.24-23.05.24	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	24.05.24-03.06.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	04.06.24-07.06.24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	08.06.24-12.06.24	

Дата видачі завдання 01 квітня 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Ткачов В.М.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 66 с., 6 рис., 2 дод.,
15 джерел.

ВИСОКОМОБІЛЬНА КОМП'ЮТЕРНА МЕРЕЖА, БЕЗПЛОТНИЙ
ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, МЕТОД САМОВІДНОВЛЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ,
ПОБУДОВА МЕРЕЖІ.

Метою кваліфікаційної роботи є проведення досліджень з метою розробки та вдосконалення методів самовідновлення високомобільної комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА. У рамках дослідження необхідно розглянути основні аспекти побудови високомобільних мереж, використання БПЛА для вирішення цієї задачі, методи побудови та налагодження мережі на базі рою БПЛА, а також різні топології мережі, які можуть бути використані для рою БПЛА.

У ході виконання кваліфікаційної роботи буде розроблений спеціальний застосунок для моделювання та тестування роботи високомобільної мережі на базі рою БПЛА. Цей додаток буде використовуватися для попереднього моделювання та аналізу роботи мережі перед початком її реальної побудови та експлуатації. За допомогою цього застосунку будуть відтворені різні сценарії та ситуації, що можуть виникати у реальних умовах, що дозволить оцінити продуктивність, надійність та ефективність мережі на базі рою БПЛА.

ABSTRACT

Master's thesis: 66 pages, 6 figures, 2 appendices, 15 sources.

HIGH-MOBILITY COMPUTER NETWORK, UNMANNED AERIAL VEHICLE, SELF-HEALING METHOD, MODELING, NETWORK CONSTRUCTION.

The major goal of this thesis is to conduct research aimed at developing and improving self-healing methods for a high-mobility computer network based on a swarm of UAVs. The study will examine key aspects of constructing high-mobility networks, the use of UAVs to address this task, methods for building and configuring a network based on a swarm of UAVs, and various network topologies that can be employed for a UAV swarm.

During the execution of the qualification work, a specialized application will be developed for modeling and testing the performance of a high-mobility network based on a UAV swarm. This application will be used for preliminary modeling and analysis of the network's operation prior to its actual construction and deployment. Through this application, different scenarios and situations that may arise in real-world conditions will be simulated, allowing for the assessment of the performance, reliability, and efficiency of the network based on a UAV swarm.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ПОБУДОВИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОМОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ БЕЗ ЗАСТОСУВАННЯ РОЮ БПЛА.....	11
1.1 Аналіз проблеми побудови мережі	11
1.2 Застосування БПЛА як вирішення задачі покращення мобільності та масштабованості мережі.....	15
1.3 Огляд недоліків рою БПЛА у побудові високомобільної комп'ютерної мережі.....	17
1.4 Постановка задачі.....	19
2 ОГЛЯД ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МЕРЕЖІ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	22
2.1 Аналіз підходів до побудови мережі.....	22
2.2 Дослідження топологій високомобільної мережі при інтерактивній системі розгортання та концепції мережної архітектури	24
2.3 Створення програмного застосунку для моделювання мережі.....	28
2.4 Метрики якості створеної мережі.....	30
3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІД ЧАС МОДЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	37
3.1 Проведення тестів для контрольованих ситуацій.....	37
3.2 Аналіз отриманих результатів та висновки.....	44
4 АПРОБАЦІЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЯ ЩОДО ЗАСТОСОВАНОГО МЕТОДУ	47
4.1 Апробація результатів досліджень.....	47
ВИСНОВКИ.....	52
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	54

ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	56
ДОДАТОК Б Фрагменти коду створеного програмного застосунку	63

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

4G – четверте покоління мобільного радіозв'язку

5G – п'яте покоління бездротових систем

Ad hoc – це децентралізовані бездротові мережі, які не потребують інфраструктури та кожен вузол маршрутизує дані через інші вузли

FANET – літальна однорангова мережа (англ., Flying Ad Hoc Network)

GPS – система глобального позиціювання (англ., Global Positioning System)

Mbps – мегабіти за секунду

MIMO – багатоканальний вхід-вихід (англ., Multiple Input Multiple Output)

NCS – мережева система керування (англ., Networked Control System)

QAM – квадратурно-амплітудна модуляція (англ., Quadrature Amplitude Modulation)

RF – радіочастота (англ., Radio Frequency)

VANET – транспортна однорангова мережа (англ., Vehicular Ad Hoc Network)

Wi-Fi – бездротова правдивість відтворення (англ., Wireless Fidelity)

ВСТУП

У сучасному світі, де швидкість і надійність передачі даних є критичними факторами, високомобільні комп'ютерні мережі стають все більш важливими. Вони забезпечують зв'язок між рухомими об'єктами, такими як автомобілі, поїзди, літаки, кораблі та навіть дрони. Однак, забезпечення стабільної комунікації в умовах високої мобільності є складною задачею, яка вимагає нових підходів та технологій.

Одним з потенційних рішень для побудови високомобільних мереж є застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). БПЛА, відомі також як дрони, можуть бути використані для створення рою, який забезпечує комунікацію між рухомими об'єктами. Застосування рою БПЛА дозволяє створити гнучку та масштабовану мережу, яка може адаптуватися до змінних умов та вимог.

Метою даної роботи є дослідження методу самовідновлення високомобільної комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА. У роботі будуть розглянуті основні аспекти побудови високомобільних мереж, застосування БПЛА для вирішення цієї задачі, методи побудови та налагодження мережі на базі рою БПЛА, а також топології мережі для рою БПЛА.

Окрема увага буде приділена методу контролю усіх БПЛА на одному екрані. Цей метод дозволить оператору мережі ефективно керувати та моніторити всіма БПЛА в рої, забезпечуючи стабільну та безперебійну комунікацію.

Для досягнення поставленої мети буде розроблений додаток для моделювання та тестування мережі на базі рою БПЛА. Цей додаток дозволить провести різні сценарії та експерименти для оцінки ефективності та надійності мережі. На основі результатів тестування будуть зроблені висновки та рекомендації щодо подальшого вдосконалення системи.

У цій роботі будуть використані методи аналізу, моделювання, програмування та експериментального дослідження. Очікується, що результати цієї роботи сприятимуть розвитку висококомірних комп'ютерних мереж на базі рою БПЛА та знайдуть застосування в різних сферах, таких як транспорт, логістика, безпека та багато інших.

1 АНАЛІЗ ПОБУДОВИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОМОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ БЕЗ ЗАСТОСУВАННЯ РОЮ БПЛА

1.1 Аналіз проблеми побудови мережі

Зв'язок та передача даних є невід'ємною частиною нашого повсякденного життя, саме тому побудова ефективної та надійної мережі на велику площу території стає неабияким викликом.

Існують різні рішення для побудови мережі на великій території. Одним з таких рішень є застосування супутникових мереж. Супутникові мережі є одним з найефективніших рішень для побудови мережі на великій території. Ці мережі використовують для передачі сигналу між вузлами супутники, які обертаються навколо Землі на великій висоті.

Для побудови супутникової мережі потрібно мати супутники, які розташовані на значній висоті в космосі. Ці супутники повинні бути розташовані таким чином, щоб забезпечити оптимальне покриття території. Зазвичай використовуються геостаціонарні супутники, які розташовані на висоті близько 36 тисяч кілометрів над екватором. Це дозволяє супутникам залишатися нерухомими відносно поверхні Землі, що забезпечує постійний зв'язок з певною територією.

Однією з переваг супутникових мереж є їх широкий охоплюючий зв'язок. Супутники можуть покривати великі території, включаючи віддалені та важкодоступні регіони, де провідний зв'язок або інші традиційні методи передачі сигналу можуть бути недостатніми або неможливими. Це робить супутникові мережі особливо корисними для комунікації в регіонах з обмеженим інфраструктурним розвитком, віддалених островів, морських та повітряних просторів.

Однак, супутникові мережі також мають свої недоліки. Перш за все, вони потребують значних витрат на розгортання та управління супутниками.

Вартість запуску та утримання супутників може бути досить високою. Крім того, зв'язок через супутник може мати затримки, оскільки сигнал повинен пройти велику відстань в космосі. Це може вплинути на швидкість передачі даних та затримку в реальному часі. Саме через перелічені причини, представлене рішення не підходить для вирішення проблеми побудови більш локальної мережі.

Інше рішення – використання мережі мікрохвильових передавачів. Мережа мікрохвильових передавачів будується за допомогою встановлення передавачів на вежі або мачту, розташовані на високих місцевостях. Ці передавачі використовують високочастотні мікрохвилі для передачі сигналу на великі відстані. Приймачі розташовуються на відповідних місцях, що дозволяє покрити велику площу території.

Для побудови мережі мікрохвильових передавачів потрібно враховувати кілька факторів. По-перше, необхідно визначити оптимальне розташування передавачів та приймачів, щоб забезпечити максимальне покриття території. Також важливо враховувати пряму видимість між передавачами та приймачами, оскільки перешкоди, такі як будівлі або гірські хребти, можуть обмежувати передачу сигналу.

Переваги мережі мікрохвильових передавачів включають велику покриття території, що дозволяє забезпечити зв'язок на великі відстані. Ця технологія також має високу пропускну здатність, що дозволяє передавати великі обсяги даних. Крім того, мережа мікрохвильових передавачів може бути ефективно використана для забезпечення зв'язку в умовах, коли інші технології, наприклад, провідний зв'язок або супутниковий зв'язок, недоступні або непрактичні.

Однак, існують певні недоліки мережі мікрохвильових передавачів. Перш за все, ця технологія вимагає прямої видимості між передавачами та приймачами, що може бути обмеженням в умовах перешкод або нерівної місцевості. Крім того, мережа мікрохвильових передавачів може бути вразливою до погодних умов, таких як дощ або туман, які можуть впливати на

якість сигналу. Також важливо враховувати вартість побудови та підтримки такої мережі, оскільки вона може бути витратною у порівнянні з іншими технологіями зв'язку.

Враховуючи переваги та недоліки, мережа мікрохвильових передавачів може бути достатньо ефективним рішенням для забезпечення зв'язку на великі відстані та великі площі території. Однак, важливо враховувати, що місцевість та погодні умови є непередбачуваними факторами, які можуть впливати на ефективність мережі мікрохвильових передавачів. Зміна місцевості, наприклад, будівництво нових споруд або зміна ландшафту, може створювати перешкоди для прямої видимості між передавачами та приймачами. Погодні умови, такі як дощ, туман або сильний вітер, можуть впливати на якість сигналу та знижувати продуктивність мережі.

Тому, для успішної експлуатації мережі мікрохвильових передавачів, важливо мати можливість швидко пристосовуватись до нових умов. Це може включати розміщення додаткових передавачів або приймачів, зміну їх розташування або використання додаткових технологій для покращення якості сигналу. Проте на це також потрібно витратити чимало часу та ресурсів.

Також, можна використовувати мережі мобільного зв'язку, такі як 4G або 5G. 4G і 5G використовують складні схеми модуляції, такі як QAM, щоб максимізувати ефективність використання спектру та збільшити швидкість передачі даних. Мережі мобільного зв'язку, фундаментальною складовою бездротових комунікаційних систем яких є RF, будуються за допомогою розгортання базових станцій, які забезпечують покриття сигналом на великій площі території. Ці базові станції розташовуються на стратегічних місцях, щоб забезпечити оптимальне покриття та якість зв'язку. Для побудови мережі мобільного зв'язку необхідно встановити базові станції, які забезпечують передачу та прийом сигналу. Ці станції повинні бути підключені до центрального вузла, який керує роботою всієї мережі. Крім того, для забезпечення покриття на великій площі території можуть бути необхідні додаткові базові станції.

Переваги мереж мобільного зв'язку включають широкий охоплюючий зв'язок на великій площі території. Це дозволяє забезпечити зв'язок в будь-якому місці, де є покриття мережі. Також мережі мобільного зв'язку використовують передові технології, такі як 4G або 5G, які забезпечують високу швидкість передачі даних та низьку затримку. Це особливо важливо для послуг, які вимагають швидкого та надійного зв'язку, наприклад, потокова передача відео чи використання хмарних сервісів.

Однак, є деякі недоліки мереж мобільного зв'язку. Перш за все, покриття може бути обмеженим в деяких віддалених або важкодоступних місцях, де встановлення базових станцій може бути складним або непрактичним. Крім того, мережі мобільного зв'язку можуть бути вразливими до перевантаження, особливо в областях з великою кількістю користувачів. Це може призводити до зниження швидкості передачі даних та затримок у зв'язку.

Крім того, можна використовувати комбінацію різних технологій, таких як провідний зв'язок, бездротові мережі та супутникові системи, для створення гібридних мереж. Це дозволяє поєднати переваги кожної технології та забезпечити ефективний зв'язок на великій площі території.

Та все ж в результаті можна прийти до висновку, що традиційні методи побудови мереж можуть бути недостатніми для задоволення потреб сучасного світу, особливо в умовах високої мобільності.

Однією з ключових проблем побудови мережі на велику площу території є розповсюдження сигналу та мобільність. Традиційні методи передачі сигналу мають обмежену дальність дії, що робить їх неефективними для покриття великих територій, а також зазвичай повинні мати фіксоване розташування та досить складно його змінити, якщо вимоги, які потрібно задовольнити, змінилися. Наприклад, проводові з'єднання можуть бути обмежені довжиною кабелю, а бездротові точки доступу мають обмежену зону покриття.

1.2 Застосування БПЛА як вирішення задачі покращення мобільності та масштабованості мережі

Для вирішення проблеми побудови мережі на велику площу території було запропоновано застосування роїв БПЛА. Рій БПЛА – це група дронів, які працюють разом, виконуючи спільні завдання. Застосування роїв БПЛА дозволяє створити гнучку та масштабовану мережу, яка може покривати великі території та адаптуватися до змінних умов.

Однією з переваг застосування роїв БПЛА є їх здатність розповсюджувати сигнал на велику площу території. Кожен БПЛА у рої може виконувати роль вузла мережі, що дозволяє розповсюджувати сигнал на значну відстань. Таким чином, рій БПЛА може забезпечити широкий охоплюючий зв'язок на велику площу території, охоплюючи навіть важкодоступні місця.

Коли рій БПЛА використовується для створення мережі, то кожен БПЛА в системі може бути обладнаний передавачем та приймачем сигналу. Кожен БПЛА виконує роль вузла мережі, що дозволяє передавати та посилати сигнал до інших БПЛА у рої. Це створює мережу, в якій сигнал може бути переданий від одного БПЛА до іншого, охоплюючи значну відстань. Завдяки такій організації, рій БПЛА може забезпечити широкий охоплюючий зв'язок на велику площу території. Кожен БПЛА у рої може передавати сигнал до сусідніх БПЛА, які в свою чергу передають його далі. Цей процес повторюється, дозволяючи сигналу пройти від одного кінця рою до іншого, охоплюючи значну відстань. Таким чином, рій БПЛА може забезпечити зв'язок навіть у важкодоступних місцях, де встановлення традиційної інфраструктури зв'язку може бути складним або неможливим.

Ця здатність рою БПЛА розповсюджувати сигнал на велику площу території дозволяє забезпечити широкий охоплюючий зв'язок на значній відстані, що особливо важливо в ситуаціях, коли потрібно забезпечити зв'язок віддаленим або розрізненим об'єктам. Крім того, рій БПЛА може бути

використаний для створення тимчасової мережі зв'язку в надзвичайних ситуаціях, коли існуюча інфраструктура може бути пошкоджена або недоступна.

Однак, варто враховувати, що рій БПЛА також має свої обмеження. Наприклад, збільшення кількості БПЛА у рої може призвести до збільшення перешкод та інтерференції сигналу. Крім того, важливо мати належну координацію та керування роєм, щоб забезпечити ефективну роботу мережі та уникнути конфліктів між елементами системи.

Безпілотні літальні апарати мають значну перевагу у відношенні мобільності. Ця перевага полягає в їх здатності легко переміщатись та оперативно виконувати завдання в різних місцях. Зазвичай БПЛА покладається на GPS для автономної навігації через складні середовища. Мобільність БПЛА забезпечується їх компактними розмірами та легкістю. Вони можуть бути швидко розгорнуті та злагоджені в новому місці, що дозволяє операторам ефективно використовувати їх у різних ситуаціях. БПЛА можуть бути транспортовані на спеціальних платформах, включаючи автомобілі, літаки або навіть кораблі, що дозволяє їм бути використаними в різних локаціях та швидко реагувати на змінні умови.

Ця мобільність БПЛА має чимало переваг. По-перше, вона дозволяє операторам легко перевозити БПЛА до місця призначення та швидко розгортати їх для виконання завдань. Це особливо корисно в ситуаціях, коли потрібно швидко отримати або збирати інформацію з висоти. Крім того, мобільність БПЛА дозволяє їм бути використаними в різних географічних областях, включаючи важкодоступні або небезпечні місця, де людина може бути обмежена або важко досяжна. Додатковою перевагою мобільності БПЛА є їх здатність пристосовуватись до змінних умов. Вони можуть бути легко перенесені з одного місця в інше, щоб пристосуватись до нових вимог або змінних потреб. Наприклад, БПЛА можуть бути використані для моніторингу стихійних лих або пошуку втрачених осіб, переміщуючись з однієї області до іншої в залежності від потреби.

Однак, варто враховувати, що мобільність БПЛА також може мати свої обмеження. Наприклад, вони можуть бути обмежені обсягом палива або енергії, що впливає на їх час роботи та дальність польоту. Крім того, важливо мати належну інфраструктуру для транспортування та розгортання БПЛА, що може бути витратним та вимагати певних ресурсів.

Залежно від потреби, кількість БПЛА у рої може бути змінена, що дозволяє адаптувати мережу до змінних умов та вимог. Крім того, БПЛА можуть працювати разом, координуючи свої дії та взаємодіючи між собою, що забезпечує стабільну та надійну комунікацію.

Застосування роїв БПЛА для побудови мережі на велику площу території є перспективним напрямом розвитку. Вони можуть знайти застосування в різних сферах, таких як транспорт, логістика, безпека та багато інших. Дослідження та розробка методу самовідновлення високомобільної комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА є важливим кроком у напрямі покращення зв'язку та передачі даних на велику площу території.

1.3 Огляд недоліків рою БПЛА у побудові високомобільної комп'ютерної мережі

Незважаючи на переваги, рій БПЛА як рішення для побудови мережі на велику площу території також має свої недоліки. Ці недоліки можуть включати проблеми з контролем кожного з елементів системи, обмежені можливості моніторингу БПЛА та помережну побудову моделі для кращого розташування вузлів. Проте, варто дослідити підходи та технології, які можуть вирішити ці недоліки та покращити ефективність та надійність мережі на базі рою БПЛА.

Один з недоліків рою БПЛА полягає в складності контролю кожного з БПЛА в рої. Зі збільшенням кількості БПЛА у рої може виникати проблема з координацією та керуванням кожним БПЛА окремо. Це може призводити до конфліктів та перешкод у роботі мережі.

Одним з підходів до вирішення цього недоліку є розробка та застосування кращих алгоритмів та протоколів для керування роєм БПЛА. Ці алгоритми та протоколи можуть забезпечити ефективну координацію та керування елементами системи, забезпечуючи оптимальну роботу мережі. Крім того, застосування штучного інтелекту та машинного навчання може допомогти вдосконалити алгоритми керування та забезпечити автоматичне адаптування до змінних умов.

Іншим недоліком рою БПЛА є обмежені можливості моніторингу кожного з БПЛА з одного пристрою. У випадку великого рою, оператор мережі може мати складнощі з ефективним контролем та моніторингом кожного БПЛА окремо. Це може ускладнювати виявлення проблем та вирішення неполадок у мережі.

На даному етапі рішення проблеми моніторингу БПЛА включає в себе застосування розподіленої системи керування БПЛА. Тобто кожен БПЛА в мережі має власну систему моніторингу та зв'язку, яка незалежно відправляє дані про свій стан та роботу до центральної системи.

Однак, це рішення має свої недоліки. Перш за все, воно може призвести до збільшення складності та витрат на кожен БПЛА, оскільки кожен з них повинен мати власну систему моніторингу та зв'язку. Крім того, це може призвести до збільшення обсягу даних, які потрібно передавати та обробляти, що може вплинути на продуктивність та швидкість роботи мережі.

Також, використання розподіленої системи керування може ускладнити координацію та синхронізацію дій між вузлами. Без централізованого контролю, можуть виникати проблеми зі збігом дій та взаємодією між БПЛА, що може призвести до конфліктів та неефективної роботи мережі.

Ще одним недоліком рою БПЛА є неефективне розташування вузлів у мережі. У разі неправильного розташування вузлів можуть виникати проблеми зі зв'язком та покриттям сигналу. Це може призводити до зниження продуктивності та надійності мережі.

Рішення для проблеми неефективного розташування БПЛА може включати використання стандартних алгоритмів розташування, таких як випадкове розташування або розташування за певними правилами. Проте, це рішення має свої недоліки. Використання стандартних алгоритмів розташування може призвести до не оптимального розташування вузлів у мережі. Випадкове розташування може призвести до нерівномірного покриття та зв'язку, а розташування за певними правилами може не враховувати специфічні умови та потреби мережі.

1.4 Постановка задачі

Ця робота має на меті оглянути проблеми, пов'язані з побудовою та експлуатацією мережі на базі рою БПЛА, та можливі їх рішення. Виявлення та аналіз проблем, пов'язаних з побудовою мережі на базі рою БПЛА, включає детальне дослідження та розуміння проблем, які можуть виникати під час координації та керування роєм, забезпечення надійного зв'язку та безпеки мережі.

Проблема координації та керування роєм БПЛА виникає через необхідність забезпечити синхронізацію та взаємодію між вузлами системи. Це може бути складно, оскільки кожен вузол може мати свої власні обмеження та може бути під впливом зовнішніх факторів, таких як вітер або перешкоди. Проблема полягає в розробці ефективних алгоритмів та протоколів, які дозволять БПЛА спілкуватись та координувати свої дії. Це може включати визначення оптимальних шляхів руху, розподіл завдань та ресурсів між БПЛА, а також вирішення конфліктів та уникнення зіткнень.

Проблема забезпечення надійного зв'язку в мережі на базі рою БПЛА виникає через можливість перешкод та інтерференції сигналу. БПЛА можуть бути розташовані на значній відстані один від одного, а також можуть знаходитись у важкодоступних місцях, де можуть бути перешкоди для передачі сигналу. Проблема полягає в розробці механізмів автоматичного

вибору оптимального шляху передачі сигналу, а також застосування технологій, які забезпечують стійкість до перешкод та інтерференції. Це може включати використання антенних систем з більшою направленістю, застосування ретрансляції сигналу між БПЛА або застосування мультиплексування для ефективного використання доступного спектру.

У роботі будуть спрогнозовані проблеми, які можуть виникати при побудові та експлуатації мережі на базі рою БПЛА, а також будуть розроблені рішення для їх оптимізації та уникнення.

Деякі з цих проблем можуть включати складність управління великою кількістю БПЛА. При використанні рою БПЛА може виникати проблема управління та координації великою кількістю БПЛА. Це може призводити до конфліктів, зіткнень та неефективного використання ресурсів. Для оптимізації цього процесу можуть бути розроблені алгоритми та системи керування, які дозволять ефективно координувати дії БПЛА, розподіляти завдання та ресурси, а також уникати конфліктів та зіткнень.

Розробка додатку, який допоможе перевірити розроблені рішення в підході до покращення побудови та роботи мережі, є важливим етапом дослідження. Цей додаток може включати різноманітні інструменти та функціонал, які допоможуть оцінити ефективність та продуктивність мережі на базі рою БПЛА.

Один з основних компонентів додатку буде інструмент для симуляції роботи БПЛА. Цей інструмент може дозволити відтворити різні сценарії роботи БПЛА, включаючи їх розташування, рух та взаємодію. Він може допомогти визначити оптимальні параметри мережі, такі як кількість БПЛА, їх розташування та взаємодію, а також оцінити продуктивність мережі в різних умовах.

Розробка такого додатку дозволить перевірити розроблені рішення в підході до покращення побудови та роботи мережі на базі рою БПЛА. Він надасть можливість провести реалістичні експерименти та оцінити ефективність розроблених алгоритмів та протоколів. Такий додаток буде

корисним інструментом для дослідників та інженерів, що працюють над покращенням мереж на базі рою БПЛА.

В свою чергу, розробка рішень для оптимізації та уникнення цих проблем може включати в себе використання передових алгоритмів, протоколів та технологій. Дослідження та розробка таких рішень дозволить покращити побудову та експлуатацію мережі на базі рою БПЛА, забезпечуючи ефективну та надійну роботу мережі.

2 ОГЛЯД ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МЕРЕЖІ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

2.1 Аналіз підходів до побудови мережі

Системи БПЛА зазвичай спрямовані на виконання специфічних завдань, які можуть мати різну масштабність та складність. Для досягнення цих завдань використовуються мережі з різними стратегіями. У простих та невеликих місіях система БПЛА може складатися з одного БПЛА або групи недіючих БПЛА, які співпрацюють з наземним центром управління. У великих місіях кілька взаємодіючих БПЛА, які утворюють рій, можуть працювати більш ефективно завдяки спільним рішенням та інтелекту рою. Складна система може включати кілька роїв БПЛА, які з'єднані через наземну або супутникову платформу для обміну інформацією. У таких місіях рій БПЛА може бути представлений як мережна система керування.

Мережна система керування групою БПЛА є обчислювальною системою, що працює в закритому циклі через комунікаційну мережу. Вона об'єднує набір обчислювальних систем, які в даному випадку є БПЛА, із підключенням до комунікаційної мережі. Обмін контрольними та зворотними повідомленнями між обчислювальними одиницями системи, або агентами, здійснюється у вигляді інформаційних пакетів, що передаються через мережу. Функціональність типової мережної системи формується на основі двох основних компонентів: обчислювальної системи, яка здатна збирати дані за допомогою сенсорів, приймати рішення та виконувати команди за допомогою пристроїв управління; та мережі, яка базується на комунікаційних модулях, стандартах та протоколах для забезпечення обміну інформацією.

БПЛА мають вбудовані обчислювальні пристрої, які відповідають за обробку даних. Кожен БПЛА може мати кілька мікросервісів, які виконують специфічні завдання, такі як збір інформації, прийняття рішень щодо

управління польотом або впливу на навколишнє середовище. Як мережна система керування, група БПЛА може оцінювати переваги виконання дій та змінювати свою роботу відповідно до закритого циклу, що є характерним для таких систем.

Завдяки оцінці та реакції, ефективність кожного БПЛА зростає, дозволяючи їм працювати як група множинних агентів з метою досягнення загальної мети. Система рою проявляє емерджентність, де прості дії розділяються між багатьма агентами, що призводить до колективної поведінки, здатної вирішувати складні завдання. Розгортання БПЛА значною мірою залежить від бездротових і мережних технологій для передачі конкретних даних та управляючих команд між БПЛА або між БПЛА та наземним центром управління, що призводить до використання двох стратегій розгортання БПЛА: інтерактивної та неінтерактивної.

У неінтерактивній стратегії розгортання кожен БПЛА прямо підключений до наземної станції керування, що використовується для моніторингу статусу БПЛА, прийняття рішень та надсилання команд. Наземна станція здійснює контроль над усіма БПЛА, збирає дані про їх стан, такі як місцезнаходження та стан сенсорів, і надсилає нові команди, наприклад, щодо маршрутування.

Ця стратегія призводить до створення простої мережі, яка не може бути поділена на більші підмережі. Кожен БПЛА стає частиною єдиної системи керування мережею, оскільки кожен з них може мати власний закритий цикл керування для оптимізації своєї роботи. Проте, зв'язок залишається необхідним, оскільки БПЛА продовжують взаємодіяти з наземною станцією керування для виконання завдань зі сприйняття, обчислення, комунікації та управління.

В неінтерактивній стратегії розгортання БПЛА, наземна станція керування відіграє ключову роль у керуванні та координації дій БПЛА. Вона забезпечує централізоване управління та контроль над БПЛА, що дозволяє ефективно виконувати завдання. Однак, ця стратегія може мати обмежену

масштабованість, оскільки збільшення кількості вузлів може призвести до перевантаження наземної станції та зниження продуктивності системи.

У стратегії інтерактивного розгортання БПЛА, рій БПЛА може бути розміщений повністю автономно, приймаючи власні рішення, які базуються на сприйнятті навколишнього середовища та обміні інформацією з іншими вузлами. Цей підхід дозволяє рою БПЛА співпрацювати між собою та координувати свої дії для досягнення спільної мети. Під час автономного режиму роботи, БПЛА використовують повітряні мережі зі сприятливими характеристиками прямого зв'язку для передачі даних та прийняття рішень на основі інформації про навколишнє середовище. Цей підхід дозволяє рою БПЛА працювати ефективно в змінних умовах та не вимагає повного зображення всього рою у мережі.

Незалежно від топології мережі, надійна бездротова комунікаційна система є важливою для успішної роботи зграї БПЛА. Інтерактивна стратегія розгортання БПЛА дозволяє створювати мережі з різними топологіями, такими як мережа на основі інфраструктури, мережа з ad hoc зв'язками та мережа на основі кластерів. Кожна з цих топологій має свої переваги та використовується в залежності від вимог та умов місії.

Ці різні топології побудови мережі за інтерактивною стратегією дозволяють забезпечити оптимальну координацію та зв'язок між БПЛА, що сприяє більш гнучкому та ефективному використанню БПЛА порівняно з неінтерактивною стратегією.

2.2 Дослідження топологій високомобільної мережі при інтерактивній системі розгортання та концепції мережної архітектури

Стратегія інтерактивного розгортання БПЛА передбачає пряму комунікацію між БПЛА або використання ad hoc зв'язків. Це означає, що топологія мережі може мати різні рівні складності, від простих мереж, що базуються на зв'язку з наземною станцією, до складних мереж, що

використовують повітряно-повітряний зв'язок. У випадку повітряно-повітряного зв'язку, мережа може бути простою, з одним кластером БПЛА, або складною, з включенням кількох кластерів або великої пласкої ad hoc мережі.

У стратегії інтерактивного розгортання БПЛА, мережа, побудована на основі інфраструктури, використовує схожу топологію з топологією, що використовується в неінтерактивному розгортанні, де кожен БПЛА підключений безпосередньо до земельної контрольної станції. Однак, у випадку інтерактивного розгортання, БПЛА можуть спілкуватися один з одним через земельну станцію, яка виступає посередником у комунікаціях. Проте, передавати всю інформацію про керування через земельну станцію може призвести до низької надійності системи через наявність єдиного точка відмови.

Щодо прийняття рішень, можна використовувати централізований або децентралізований підхід. У централізованому підході всі рішення приймаються земельним контролем на основі інформації, отриманої від усіх БПЛА (рисунок 2.1). У децентралізованому підході кожен БПЛА має можливість приймати власні рішення на основі інформації, якою БПЛА обмінюються між собою через земельний контролер, який виступає лише як посередник.

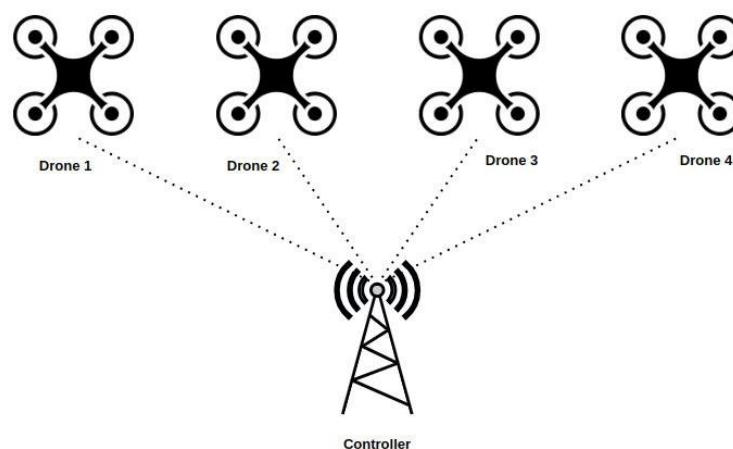


Рисунок 2.1 – Приклад мережі на основі інфраструктури

В інтерактивній стратегії розгортання БПЛА, спілкування між вузлами може відбуватися через бездротові канали, такі як Wi-Fi. Це дозволяє БПЛА обмінюватися інформацією про своє становище, маршрути та інші параметри, що сприяє кращій координації та спільній роботі в режимі рою. Однак, важливо забезпечити надійну та безпечну комунікацію між вузлами, а також стабільний зв'язок з земельною контрольною станцією, щоб уникнути конфліктів та збоїв у системі.

Мережа, побудована на основі кластерів, є типом мережі, де БПЛА з'єднані через кластерні вузли (рисунок 2.2). Кожен кластерний вузол виконує роль головного кластера для сусідніх БПЛА, і всі дані, що генеруються або отримуються в цих сусідніх БПЛА, передаються через головний кластерний вузол. Проте, цей підхід може призвести до перевантаження головного кластера та затримок у комунікації. Система може бути розширена для включення декількох кластерів, кожен зі своїм власним головним кластером. Головні кластери відповідають за встановлення зв'язку між кластерами та з контролем землі. Прийняття рішень може бути розподілено між БПЛА, засноване на їхніх власних рішеннях або досягненні консенсусу.

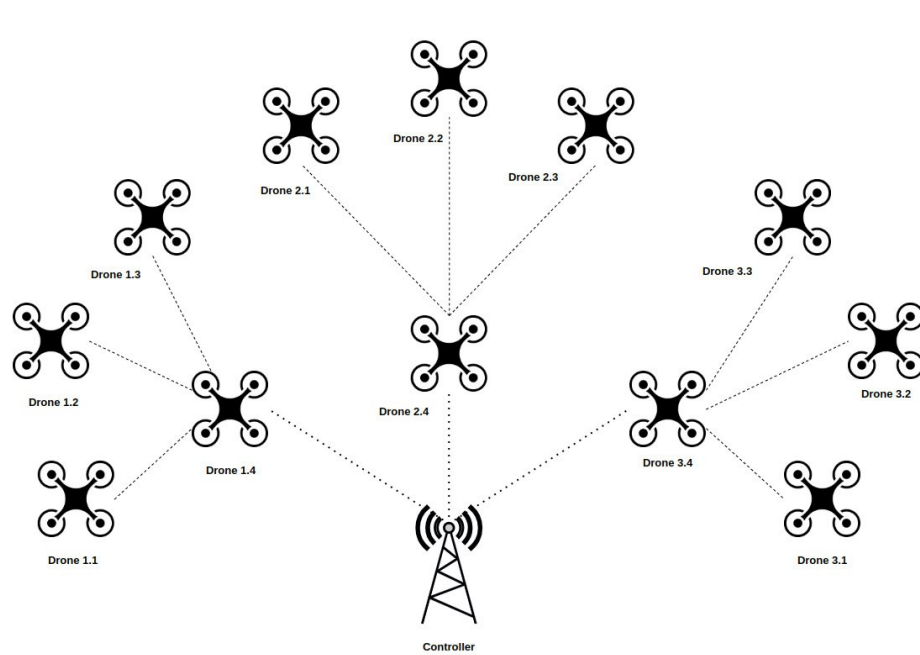


Рисунок 2.2 – Мережа на основі кластерів

Кластерна топологія мережі дозволяє організувати БПЛА в групи, що сприяє кращій координації та спільній роботі між ними. Кожен кластер може мати свою власну ієрархію та комунікаційні протоколи. Головний кластерний вузол виконує важливу роль у забезпеченні зв'язку між БПЛА в кластері та з контрольною станцією на землі. Прийняття рішень може бути розподілено між БПЛА в кластері, що дозволяє реалізувати децентралізовану систему керування.

БПЛА можуть взаємодіяти через бездротову мережу з ad hoc організацією, де не потрібні спеціальні центральні вузли для маршрутизації (рисунок 2.3). Це дозволяє зменшити вплив відмов окремих апаратів на загальну працездатність системи. Такий тип мережі зменшує потребу в широкій пропускну здатності та знижує затримки передачі даних, оскільки зв'язки між апаратами короткі.

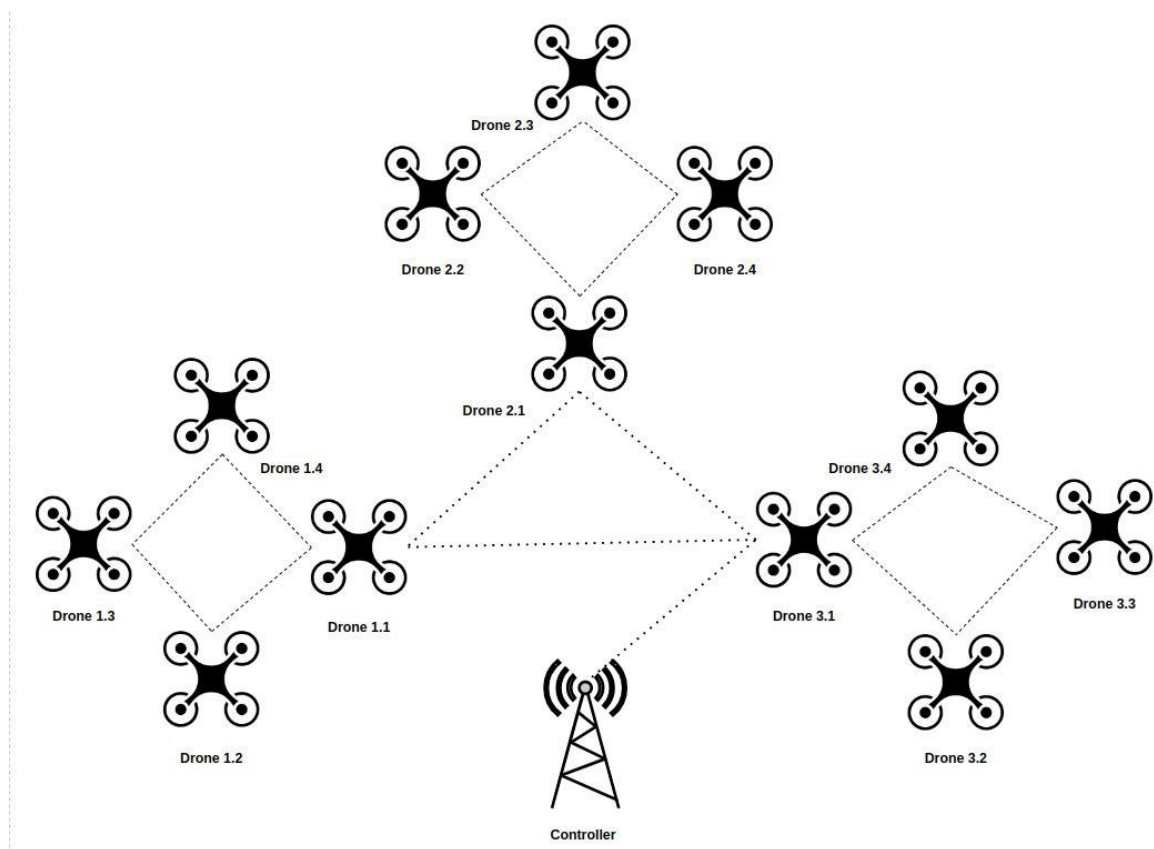


Рисунок 2.3 – Мережа з ad hoc зв'язками

Переваги мереж на основі ad hoc включають масштабованість, стійкість до відмов, незалежність кожного пристрою від централізованого управління, а також можливість швидкої настройки та розгортання мережі.

У мережах на основі ad hoc кожен БПЛА може взаємодіяти з іншими апаратами безпосередньо або через посередників у вигляді ad hoc зв'язків. Оскільки маршрутизація може стати проблемою в мережі без централізованої структури, можливо організувати мережу на основі ad hoc на окремі кластери, кожен з яких функціонує як окрема самоорганізована система. Такі кластери можуть мати спеціальні вузли, що виступають у ролі шлюзів для обміну даними між різними частинами мережі.

Мережі на основі ad hoc є особливо корисними в ситуаціях, коли немає доступу до інфраструктури зв'язку, наприклад, в умовах надзвичайних ситуацій або віддалених районах. Вони також можуть бути використані в мобільних додатках, де потрібна гнучкість та незалежність від централізованого управління.

2.3 Створення програмного застосунку для моделювання мережі

Аналізуючи різні підходи до побудови мережі на базі рою БПЛА, можна зробити висновок, що не існує універсального та оптимального рішення для створення такої системи. При плануванні та розгортанні мережі необхідно враховувати багато факторів, які можуть вплинути на її ефективність та надійність.

Перед початком розробки та налаштування мережі, важливо провести детальний аналіз умов та спрогнозувати можливі проблеми, які можуть виникнути під час експлуатації. Для успішного створення мережі рою БПЛА необхідно вивчити місцевість, включаючи територію, яку потрібно охопити, перешкоди, які можуть впливати на передачу сигналу, а також оптимальне розташування БПЛА на мапі. Після цього, під час розгортання мережі в реальних умовах, необхідно відстежувати роботу системи та, при

необхідності, вносити корективи до конфігурації мережі, адже можуть виявитись недоліки, які не були враховані при розрахунку розташування БПЛА на місцевості через людський фактор. Цей процес може повторюватись декілька разів для досягнення найкращого можливого результату.

Створення додатку, який надасть усі необхідні інструменти для моделювання розташування вузлів на місцевості та тестування різних сценаріїв роботи високомобільної мережі перед безпосереднім розгортанням, може бути корисним для зменшення часу та поліпшення процесу розробки мережі.

Додаток, створений для попереднього моделювання мережі з рою БПЛА, має кілька корисних функцій та переваг. Він дозволяє користувачеві візуалізувати та змоделювати розташування вузлів на місцевості, що допомагає зрозуміти, як вони будуть взаємодіяти з оточуючими об'єктами та іншими БПЛА. Додаток також дозволяє виконувати тестові сценарії, що допомагає виявити можливі проблеми та знайти оптимальні рішення перед розгортанням реальної мережі.

Переваги використання додатка для попереднього моделювання мережі з рою БПЛА включають економію часу та ресурсів, покращення продуктивності, зменшення ризиків та помилок, а також оптимальне планування розгортання мережі. Додаток допомагає зекономити час та ресурси, оскільки моделювання та тестування мережі перед розгортанням дозволяє виявити потенційні проблеми та знайти оптимальні рішення, уникнувши зайвих витрат. Він також допомагає покращити продуктивність мережі, визначити оптимальні налаштування та стратегії роботи БПЛА. Крім того, додаток допомагає знизити ризики та помилки, виявляючи їх перед розгортанням реальної мережі. Він також допомагає забезпечити оптимальне планування розгортання мережі, враховуючи місцевість, характеристики БПЛА та вимоги місії. Застосування додатка дозволяє забезпечити ефективне використання ресурсів.

2.4 Метрики якості створеної мережі

Після вивчення проблематики побудови мережі на базі рою БПЛА, важливим кроком є огляд метрик, які можуть бути використані для порівняння різних мереж між собою. Цей огляд метрик є важливим етапом у розробці та оптимізації будь-яких мереж, оскільки він дозволяє об'єктивно оцінити їх продуктивність, надійність та ефективність. Важливо дослідити їх сутність, методи вимірювання та аналізу, а також їхнє застосування у контексті мереж на базі рою БПЛА.

Пропускна здатність є однією з ключових метрик для оцінки продуктивності та ефективності високомобільних мереж. Вона вимірює кількість даних, які можуть бути передані через мережу протягом певного часу. Пропускна здатність є важливим показником, оскільки вона визначає максимальний обсяг даних, який мережа може обробити та передати.

Для вимірювання пропускну здатності високомобільних мереж можна використовувати різні методи. Один з найпоширеніших методів - це відправка тестових пакетів даних через мережу та вимірювання часу, який потрібний для їх передачі. Цей метод може бути застосований як для проведення експериментів у контрольованому середовищі, так і для вимірювання пропускну здатності в реальних умовах експлуатації мережі.

Пропускна здатність високомобільних мереж може бути піддана впливу різноманітних факторів. Один з таких факторів – швидкість руху мобільних пристроїв або БПЛА, яка може впливати на пропускну здатність мережі. При високих швидкостях руху можуть виникати проблеми з передачею даних, що може призвести до зниження пропускну здатності.

Інший фактор, що впливає на пропускну здатність, – це технологія передачі даних, яка використовується. Наприклад, вибір між Wi-Fi, Bluetooth, мережами мобільного зв'язку або супутниковими мережами може мати вплив на пропускну здатність. Кожна з цих технологій має свою максимальну

швидкість передачі даних, що впливає на загальну пропускну здатність мережі.

Третій фактор, який впливає на пропускну здатність, – це завантаженість мережі. Кількість підключених пристроїв та обсяг передаваних даних можуть впливати на пропускну здатність мережі. Збільшення кількості підключених пристроїв або обсягу передаваних даних може призвести до зниження пропускну здатності мережі.

Оцінка пропускну здатності високомобільних мереж вимагає аналізу отриманих даних та врахування факторів, що впливають на неї. Аналіз пропускну здатності допомагає визначити максимальний обсяг даних, який мережа може передати, а також ідентифікувати можливі проблеми, що впливають на продуктивність мережі. Це дозволяє розробникам та операторам мережі вживати заходів для оптимізації та покращення пропускну здатності.

Затримка є ще однією важливою метрикою для оцінки високомобільних мереж. Вона вимірює час, необхідний для передачі даних від відправника до одержувача через мережу. Затримка має велике значення, оскільки вона визначає швидкість доставки даних та може впливати на реалізацію додатків у режимі реального часу.

Для вимірювання затримки високомобільних мереж можна використовувати той самий метод, що й для вимірювання пропускну здатності мережі – це відправка тестових пакетів даних через мережу та вимірювання часу, який потрібний для їх доставки від відправника до одержувача. Цей метод може бути застосований як для проведення експериментів у контрольованому середовищі, так і для вимірювання затримки в реальних умовах експлуатації мережі.

На затримку можуть впливати різні фактори. Пропускна здатність мережі є одним з них, оскільки великий обсяг даних може збільшити затримку. Технологія передачі даних також має значення, оскільки різні технології можуть мати різні рівні затримки. Фізична відстань між відправником та одержувачем також може впливати на затримку, збільшуючи її при збільшенні

відстані. Навантаження мережі також може впливати на затримку, оскільки збільшення кількості підключених пристроїв або обсягу передаваних даних може призвести до збільшення затримки.

Для оцінки затримки високомобільних мереж можуть використовуватися різні методи, такі як статистичний аналіз, моделювання та симуляція мережі. Аналіз затримки допомагає визначити час, необхідний для доставки даних, та ідентифікувати можливі проблеми, що впливають на продуктивність мережі. Це дозволяє розробникам та операторам мережі вживати заходів для оптимізації та покращення затримки, забезпечуючи більш ефективну передачу даних у високомобільних мережах.

Стійкість до втрати пакетів є метрикою, яка вимірює кількість пакетів, що втрачаються або пошкоджуються під час передачі через мережу. Ця метрика є важливим показником, оскільки вона визначає надійність передачі даних та може впливати на якість зв'язку.

Стійкість до втрати пакетів високомобільних мереж може бути під впливом різних факторів. Якість зв'язку, така як сигнал-шумове співвідношення, може впливати на стійкість до втрати пакетів. Погана якість зв'язку може призводити до збільшення кількості втрачених пакетів. Навантаження мережі, таке як велика кількість підключених пристроїв або великий обсяг передаваних даних, також може впливати на стійкість до втрати пакетів. Наявність перешкод або інтерференції в мережі також може спричиняти втрату пакетів, наприклад, через фізичні перешкоди або інші пристрої, що працюють на тій же частоті.

Для оцінки стійкості до втрати пакетів високомобільних мереж можуть використовуватися різні методи, подібні до тих, що були описані раніше. Аналіз стійкості до втрати пакетів допомагає визначити кількість пакетів, які втрачаються або пошкоджуються під час передачі, та ідентифікувати можливі проблеми, що впливають на надійність мережі. Це дозволяє розробникам та операторам мережі вживати заходів для покращення стійкості до втрати

пакетів та забезпечення більш надійної передачі даних у високомобільних мережах.

Енергоефективність є невід'ємною метрикою, яка вимірює ефективне використання енергії в мережі. Енергоефективність є важливим показником, оскільки мобільні пристрої мають обмежену ємність батареї, і оптимізація використання енергії може покращити тривалість роботи пристроїв та продуктивність мережі.

Для вимірювання енергоефективності високомобільних мереж можна використовувати різні методи. Один з найпоширеніших методів – це вимірювання споживання енергії пристроями в мережі під час передачі даних або в режимі очікування. Цей метод може бути застосований як для проведення експериментів у контрольованому середовищі, так і для вимірювання енергоефективності в реальних умовах експлуатації мережі.

Енергоефективність високомобільних мереж може бути піддана впливу наступних факторів. Першим фактором є вибір протоколів передачі даних, який може впливати на енергоефективність мережі. Деякі протоколи можуть бути більш енергоефективними, оскільки вони використовують менше ресурсів для передачі даних.

Другим фактором є вибір режимів роботи пристроїв, таких як режим очікування або режим сну, що може впливати на енергоефективність. Використання енергозберігаючих режимів може зменшити споживання енергії пристроями.

Третім фактором є вибір технологій передачі даних, які можуть мати різну енергоефективність. Наприклад, бездротові технології можуть споживати більше енергії порівняно з провідними технологіями передачі даних. Отже, вибір енергоефективних протоколів передачі даних, використання енергозберігаючих режимів роботи пристроїв та розгляд різних технологій передачі даних можуть сприяти підвищенню енергоефективності високомобільних мереж.

Для оцінки енергоефективності можна використати різні методи, такі як статистичний аналіз, моделювання та симуляція мережі. Аналіз енергоефективності допомагає визначити ефективність використання енергії в мережі та ідентифікувати можливі проблеми, що впливають на продуктивність мережі.

Спектральна ефективність є метрикою для оцінки продуктивності та ефективності високоскоростних мереж. Вона вимірює ефективне використання доступного спектру частот для передачі даних. Спектральна ефективність є важливим показником, оскільки вона визначає максимальну пропускну здатність мережі та забезпечує ефективне використання обмежених ресурсів спектру.

Для вимірювання спектральної ефективності високоскоростних мереж можна використовувати різні методи. Один з найпоширеніших методів - це вимірювання пропускну здатності мережі при використанні певного спектру частот. Цей метод може бути застосований як для проведення експериментів у контрольованому середовищі, так і для вимірювання спектральної ефективності в реальних умовах експлуатації мережі.

Спектральна ефективність високоскоростних мереж може мати вплив різних факторів. Ширина смуги спектру, яка виділяється для передачі даних, може впливати на спектральну ефективність. Більша ширина смуги спектру може дозволити передавати більше даних, що покращує спектральну ефективність. Різні методи доступу до спектру, такі як часовий, частотний або кодовий розподіл, також можуть мати різну спектральну ефективність. Вибір ефективного методу доступу до спектру може покращити спектральну ефективність мережі. Міжсимвольний перехід, який виникає при передачі даних, також може впливати на спектральну ефективність. Великий міжсимвольний перехід може призводити до втрати ефективності передачі даних.

Оцінка спектральної ефективності вимагає аналізу отриманих даних та врахування факторів, що впливають на неї. Для цього можуть

використовуватися різні методи, такі як статистичний аналіз, моделювання та симуляція мережі. Аналіз спектральної ефективності допомагає визначити ефективне використання доступного спектру частот та ідентифікувати можливі проблеми, що впливають на продуктивність мережі. Це дозволяє розробникам та операторам мережі вживати заходів для оптимізації та покращення спектральної ефективності.

Спектральна ефективність є важливою метрикою для різних сценаріїв високомобільних мереж, таких як мережі зв'язку між БПЛА, мережі зв'язку між мобільними пристроями або мережі зв'язку в транспортних системах. Вона допомагає визначити максимальну пропускну здатність мережі та забезпечує ефективне використання обмежених ресурсів спектру.

Надійність вимірює ступінь, до якого мережа може забезпечити неперервний зв'язок та передачу даних. Для вимірювання надійності високомобільних мереж можна використовувати різні методи. Один з найпоширеніших методів – це відправка тестових пакетів даних через мережу та вимірювання кількості успішно доставлених пакетів. Цей метод може бути застосований для проведення експериментів у різних типах середовища.

На надійність мережі можуть вплинути такі фактори, як перешкоди та інтерференція, якість зв'язку та навантаження мережі. Адже, до прикладу, наявність перешкод або інших пристроїв, що працюють на тій же частоті, можуть спричинити втрату пакетів або пошкодження даних.

Аналіз надійності допомагає визначити ступінь, до якого мережа може забезпечити неперервний зв'язок та передачу даних. Він дозволяє ідентифікувати можливі проблеми, що впливають на надійність мережі, такі як втрата пакетів або пошкодження даних.

Метрика безпеки високомобільних мереж є важливим інструментом для оцінки рівня безпеки в контексті мобільних мереж, де присутні рухомі вузли та змінні умови зв'язку. Вона дозволяє визначити, наскільки ефективно захищена мережа від різних загроз, таких як несанкціонований доступ, атаки на безпеку даних та інші потенційні ризики.

Опис метрики безпеки високомобільних мереж включає в себе розгляд таких аспектів, як аутентифікація, авторизація та захист даних, що передаються.

Метрика аутентифікації та авторизації відображає ефективність процесу перевірки ідентичності та контролю доступу до мобільних вузлів. Вона вимірює, наскільки надійно встановлюється, що мобільний вузол є дійсним і має право отримувати доступ до мережі.

Метрика захисту даних відображає рівень захищеності даних, що передаються через високомобільну мережу. Вона вимірює, наскільки ефективно захищені дані від несанкціонованого доступу, перехоплення або зміни під час передачі.

Співзвучна метрика захисту від атак відображає рівень захищеності високомобільної мережі від різних типів атак, таких як атаки на безпеку мережі, атаки на безпеку даних, атаки на безпеку протоколів тощо. Вона вимірює, наскільки ефективно мережа виявляє та запобігає таким атакам.

Метрика відновлення після випадків непередбаченої недоступності відображає рівень ефективності системи відновлення після випадків непередбаченої недоступності, таких як втрата зв'язку або відмова в обслуговуванні. Вона вимірює, наскільки швидко та ефективно мережа відновлюється після таких випадків.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІД ЧАС МОДЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Проведення тестів для контрольованих ситуацій

У даному дослідженні розглядаються системи, що використовуються в високомобільних мережах з роєм БПЛА. Описані вище підходи мають потенціал для забезпечення безперебійної роботи мережі навіть у випадку відмови одного з вузлів. Однак, для оцінки ефективності та працездатності цих підходів необхідно провести моделювання та аналіз роботи мережі в різних сценаріях.

Для цього була розроблена програма, яка дозволяє моделювати роботу мережі, створеної з рою БПЛА. Ця програма дозволяє створити віртуальну мережу та провести тестування різних можливих сценаріїв поведінки БПЛА. Шляхом введення різних параметрів, таких як кількість вузлів, їх розташування та характеристики, можна відтворити різні умови роботи мережі.

Під час моделювання будуть враховані різні фактори, такі як час відновлення роботи мережі, вплив відмови вузла на інші вузли та загальну продуктивність мережі. Це дозволить оцінити ефективність використання резервних вузлів та алгоритмів маршрутизації в умовах відмови вузлів. А отримані результати моделювання допоможуть визначити оптимальні параметри та налаштування для побудови мережі з роєм БПЛА з метою забезпечення надійності та безперебійності роботи. Додатково, ці результати можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів маршрутизації та розробки нових стратегій управління мережею з роєм БПЛА.

У цих дослідженнях для прикладу будуть використані характеристики БПЛА, подібні до характеристик БПЛА DJI MAVIC 3 PRO для побудови мережі з роєм БПЛА. Цей БПЛА має 43 хвилини автономного часу роботи в

русі при безвітряній погоді, 35 хвилин роботи при триманні у повітрі, здатність передавати сигнал на відстані до 15 км та максимальна висота польоту - 6000 метрів.

Наступним кроком для побудови мережі варто розрахувати найкращий автономний час роботи та найкращу дистанцію між вузлами для розташування на місцевості.

Для розрахунку найкращого автономного часу роботи БПЛА, можна використовувати формулу:

$$T_{\text{авт}} = T_{\text{рух}} - T_{\text{зам}}, \quad (3.1)$$

де $T_{\text{авт}}$ – найкращий автономний час роботи БПЛА;

$T_{\text{рух}}$ – час роботи в русі при безвітряній погоді;

$T_{\text{зам}}$ – час, який БПЛА витрачає на переключення та запуск нового БПЛА.

Для розрахунку найкращого часу заміни БПЛА на інший, можна використовувати формулу:

$$T_{\text{зам}} = T_{\text{рух}} - T_{\text{зам}} - T_{\text{нал}}, \quad (3.2)$$

де $T_{\text{зам}}$ – найкращий час заміни БПЛА;

$T_{\text{нал}}$ – час, який БПЛА витрачає на налаштування нового БПЛА.

Для визначення найкращої дистанції, на яку БПЛА може віддалятися та безперебійно передавати сигнал, можна використовувати формулу:

$$D_{\text{макс}} = V_{\text{пер}} \times T_{\text{авт}}, \quad (3.3)$$

де $D_{\text{макс}}$ – найкраща дистанція, на яку БПЛА може віддалятися та безперебійно передавати сигнал;

$V_{\text{пер}}$ – швидкість передачі сигналу БПЛА.

Отримані значення $T_{\text{авт}}$, $T_{\text{зам}}$ та $D_{\text{макс}}$ дозволяють визначити оптимальні параметри для БПЛА під час побудови мережі.

Далі в додатку необхідно додати БПЛА, з яких буде змодельована мережа, та задати їм відповідні налаштування (Рисунок 3.1). Для моделювання системи для подальшого тестування різних можливих сценаріїв в мережі, буде використано 10 БПЛА.

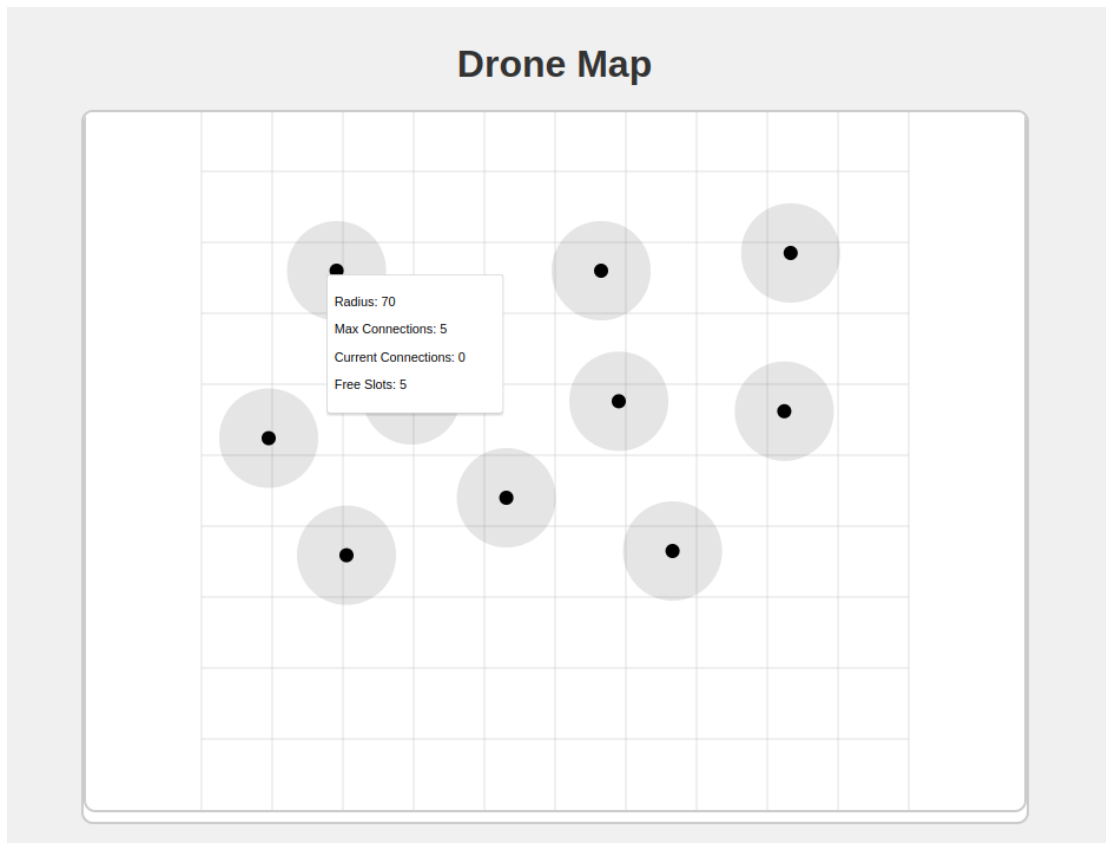


Рисунок 3.1 – Змодельована мережа БПЛА без жодного з'єднання між вузлами та з інформацією про один конкретний вузол

Після додавання БПЛА на умовну мапу, потрібно утворити між ними з'єднання, щоб вузли отримали можливість обмінюватись інформацією. В додатку БПЛА, які мають з'єднання хоча б з одним іншим БПЛА та які не мають жодних проблем, по типу розрядженого акумулятора або непередбачуваного збою в роботі БПЛА, матимуть навколо себе радіус зеленого кольору (рисунок 3.2).

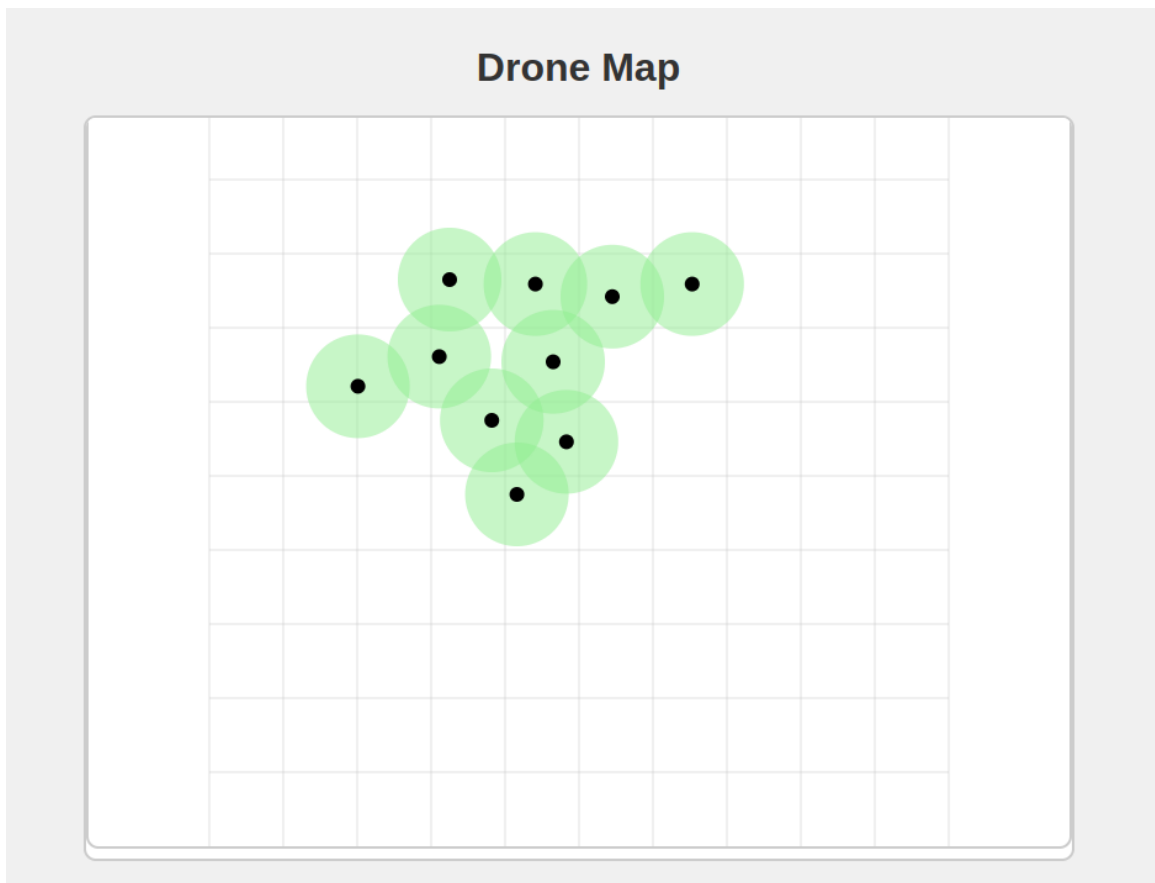


Рисунок 3.2 – Змодельована мережа БПЛА, де кожен БПЛА має з'єднання хоча б з одним іншим БПЛА в системі

Для змодельовання ситуації, коли є мережа з 10 БПЛА, розташованих на відстані 7 км один від одного, можна використовувати формулу для розрахунку середнього часу передачі даних між вузлами.

Середній час передачі даних (T) можна обчислити за формулою:

$$T = \frac{D}{V}, \quad (3.4)$$

де D – відстань між БПЛА;

V – швидкість передачі даних.

У даному випадку, припустимо відстань між вузлами (D) становить 7 км, а швидкість передачі даних складає 10 Mbps (мегабіт на секунду). Таким

чином, за представленою вище формулою, середній час передачі даних між вузлами в змодельованій системі становить 0.7 секунди.

Якщо один з вузлів зникне, передача даних між вузлами може погіршитись. Якщо мережа має альтернативні шляхи та алгоритми маршрутизації, які можуть швидко перенаправити комунікацію через інші доступні вузли, погіршення може бути мінімальним. Однак, якщо немає альтернативних шляхів або алгоритми маршрутизації не ефективні, погіршення може бути значним.

Для оцінки впливу відсутності одного з вузлів на передачу даних, можна порівняти середній час передачі даних до та після відмови вузла. Нехай після відмови середній час передачі даних збільшився на 0.1 секунду, тобто становить 0.8 секунди. Тоді відсоток погіршення можна обчислити за формулою:

$$\text{Відсоток погіршення} = \frac{T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}}}{T_{\text{вх}}} \times 100\%. \quad (3.5)$$

Таким чином, відсутність одного з вузлів при умові, що середній час передачі даних збільшиться лише на 0.1, може призвести до погіршення передачі даних на 14.29%. Однак, це значення може варіюватись в залежності від конкретних умов мережі та алгоритмів маршрутизації, що використовуються. Враховуючи відсутність резервних БПЛА у мережі, погіршення передачі даних може бути значним. Наприклад, якщо середній час збільшиться ще на 0.1 секунду, то відсоток погіршення становитиме 28.57%.

Для забезпечення надійності та стабільності мережі в такій ситуації, варто розглянути впровадження резервних вузлів або дублювання функцій. Це дозволить забезпечити безперебійну роботу мережі та зменшити вплив відмови одного з вузлів на загальну продуктивність системи.

Один з можливих сценаріїв, який можна розглянути для прикладу, – це ситуація, коли один вузол виходить з ладу через відносно передбачувану та контрольовану причину. Наприклад, уявімо, що у одного з БПЛА сідає

батарея. Цей сценарій дозволяє оцінити, як система реагує на відмову вузла та як швидко вона може відновити комунікацію та функціональність мережі.

Так, як умови роботи у БПЛА в системі можуть відрізнятися через специфіку розташування або кількості приєднаних до нього вузлів або рівня навантаження системи, БПЛА з однаковими характеристиками можуть мати реальний час роботи різний. В додатку це реалізовано тим, що для кожного БПЛА рандомно обираються числа - відсотки - наскільки сильна була витрата в певний період часу. Таким чином, ми ніколи в додатку не будемо заздалегідь знати, який саме з вузлів та в який момент вийде з ладу.

В момент, коли у БПЛА показник заряду доходить до певного встановленого рівня, БПЛА подає сигнал системі або головному вузлу, це залежить від реалізації мережі. Після отримання сигналу, система автоматично запускає процес, який передає необхідну інформацію, таку як координати місцезнаходження вузла, який потрібно замінити, резервному БПЛА, і БПЛА починає рух до вказаної точки. В середньому дана модель БПЛА може розвивати горизонтальну швидкість руху до 75 км/год, тому швидкість заміни вузла залежатиме від його розташування на місцевості. Якщо припустити, що початкова відстань від БПЛА, який вийшов з ладу, до резервного БПЛА становить 10 кілометрів, то за формулою можна знайти час, за який відбудеться заміна:

$$t = \frac{S}{v} = \frac{10}{75} = 0.133 \text{ год}, \quad (3.6)$$

де S – це шлях від резервного БПЛА до несправного вузла;

а v – це швидкість руху резервного БПЛА.

Тобто час заміни БПЛА на цій відстані становитиме приблизно 8 хвилин, що є досить великим показником. У випадку, коли якийсь з вузлів буде критично важливим для системи, подібна затримка може мати серйозні наслідки. Певний час ще працюватиме в системі перший БПЛА, очікуючи заміну в вигляді резервного БПЛА, проте в ситуації непередбачуваної та

неспрогнозованої втрати важливого вузла, коли зв'язок з ним буде втрачено одномоментно, час гратиме важливу роль.

Саме тому варто розташовувати бази з резервними БПЛА якомога ближче до найважливіших вузлів системи. Тому що якби в даній ситуації відстань між базою з резервними БПЛА та несправним вузлом становила, наприклад, 3 кілометри, то час, за який відбулась би заміна, становив приблизно 2,5 хвилини, що значно покращило показники метрики відновлення після випадків непередбаченої недоступності

$$t = \frac{S}{v} = \frac{3}{75} = 0.04 \text{ год.} \quad (3.7)$$

Після прибуття резервного БПЛА на визначені координати, він розпочне виконання своєї основної функції, яка полягає в установленні прямого з'єднання з іншими БПЛА, з якими попередньо встановлено зв'язок несправним БПЛА. Резервний БПЛА отримає список вузлів, з якими несправний БПЛА мав з'єднання, і встановить з ними зв'язок.

Після успішного встановлення зв'язку з усіма необхідними вузлами системи, резервний БПЛА буде готовий до передачі даних та виконання завдань. У разі, якщо несправний БПЛА все ще перебуває в системі, його можна вивести з системи без втрати та затримок передачі пакетів даних.

Цей процес вимагає точного визначення стану кожного БПЛА та встановлення стабільного з'єднання між резервним БПЛА та іншими вузлами системи. Після успішного з'єднання резервний БПЛА може продовжити виконувати завдання, які були призначені несправному вузлу, забезпечуючи неперервну роботу системи.

Важливо враховувати, що в процесі виведення несправного БПЛА з системи необхідно забезпечити безперебійну передачу даних та збереження функціональності системи. Для цього можуть використовуватися механізми резервування та перенаправлення даних, щоб забезпечити неперервність обміну інформацією між БПЛА та іншими пристроями в системі.

У разі, якщо кілька БПЛА вийшли з ладу одночасно, може виникнути ситуація, коли резервних БПЛА недостатньо для заміни всіх несправних. В такому випадку, необхідно пріоритезувати завдання та визначити, які вузли є найбільш критичними для заміни. Резервні БПЛА повинні бути спрямовані на ці пріоритетні завдання, щоб забезпечити неперервну роботу системи у важливих областях. Саме тут може стати в нагоді розроблений додаток, який може досить швидко по створеній моделі системи розрахувати можливі втрати від конкретних вузлів, і, базуючись на даних, отриманих під час тестування, буде значно легше прийняти краще рішення щодо того, який з вузлів є більш пріоритетно зберегти в мережі.

Крім того, важливо провести аналіз причин виходу з ладу кількох БПЛА одночасно, щоб уникнути подібних проблем у майбутньому. Можливо, необхідно переглянути процеси тестування та підтримки БПЛА, а також здійснити відповідні заходи для запобігання масовим випадкам виходу з ладу.

Загалом, вирішення проблеми з виходом з ладу одного чи кількох БПЛА одночасно вимагає швидкої реакції, використання додаткових резервних БПЛА та аналізу причин виникнення проблеми. Це дозволить забезпечити неперервну роботу системи та виконання завдань без значних перебоїв. Проте, використовуючи додаток для аналізу мережі, стане легше аналізувати та обирати подальші дії щодо експлуатації мережі

3.2 Аналіз отриманих результатів та висновки

Під час модельного тестування виникнення проблеми в високомобільній мережі було проведено огляд поведінки системи при виникненні проблеми. Це дозволило виявити важливі фактори, які впливають на пропускну здатність та ефективність системи.

Один з висновків полягає в тому, що розташування пунктів з резервними БПЛА поруч з важливими вузлами системи є важливим кроком. Це забезпечує

можливість швидко замінити найважливіші вузли у разі виникнення проблеми, що дозволяє забезпечити неперервну роботу системи.

Крім того, модельне тестування підкреслило важливість попереднього моделювання та перевірки системи перед її фактичною побудовою. Це дозволяє заздалегідь виявити можливі проблеми та перевірити, як система буде функціонувати в реальних умовах. Такий підхід допомагає забезпечити оптимальну роботу системи та уникнути непередбачених проблем у майбутньому.

Також зі змодельованої системи можна відслідкувати важливість того, щоб БПЛА в великій системі мав з'єднання з трьома або більшою кількістю БПЛА. Важливість даного висновку полягає в покращенні надійності та ефективності системи. Це рішення матиме позитивний вплив на подальшу роботу системи та має кілька важливих переваг.

По-перше, з'єднання БПЛА з трьома або більшою кількістю БПЛА дозволяє створити мережу, в якій БПЛА можуть обмінюватися даними та інформацією. Це забезпечує спільну координацію та співпрацю між вузлами, що дозволяє виконувати складні завдання та розподіляти навантаження між ними.

По-друге, з'єднання з більшою кількістю вузлів дозволяє забезпечити резервність та надійність системи. У разі виходу з ладу одного вузла, інші БПЛА можуть продовжувати виконувати завдання та забезпечувати неперервну роботу системи. Це зменшує вплив відмови одного БПЛА на загальну продуктивність системи та забезпечує безперебійну роботу.

По-третє, з'єднання з трьома або більшою кількістю вузлів дозволяє розширити можливості системи. БПЛА можуть обмінюватися даними, координувати свої дії та виконувати складні завдання, які вимагають спільної роботи. Це дозволяє покращити ефективність та точність виконання завдань, а також розширити можливості системи в різних сферах, таких як пошук і рятування, моніторинг або доставка.

Отже, модельне тестування виникнення проблеми в високомобільній мережі дозволило отримати важливі висновки щодо пропускної здатності та ефективності системи. Використання резервних БПЛА, розташування їх поруч з важливими вузлами та попереднє моделювання системи є важливими етапами для забезпечення неперервної та ефективної роботи системи в реальних умовах.

4 АПРОБАЦІЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЯ ЩОДО ЗАСТОСОВАНОГО МЕТОДУ

4.1 Апробація результатів досліджень

У даному дослідженні було проведено аналіз методів побудови мережі на базі рою БПЛА. Були розглянуті різні підходи та стратегії, які можуть бути використані для побудови таких мереж. Аналізувалися переваги та недоліки кожного методу з урахуванням вимог до мережі, таких як мобільність, надійність та пропускна здатність.

Також були проаналізовані різні топології мережі, які можуть бути використані для побудови мережі на базі рою БПЛА. Кожна топологія має свої переваги та обмеження, і вибір оптимальної топології залежить від багатьох розглянутих у роботі причин та факторів.

У даному дослідженні було виявлено, що побудова високомобільної мережі на базі рою БПЛА стикається з рядом викликів та проблем. Однією з таких проблем є обмежені ресурси, зокрема енергетичні. Безпілотні літальні апарати мають обмежену ємність батарей, що обмежує тривалість їхньої роботи та дальність польоту. Це може стати перешкодою для побудови стійкої та продуктивної мережі, особливо в умовах, де тривалість польоту та покриття зв'язку є критичними факторами.

Додатковою проблемою є вплив погодних умов на роботу мережі. Для подолання цієї проблеми можуть бути розроблені алгоритми автоматичного управління, які дозволять дронам адаптуватися до змінних погодних умов та забезпечити стабільну роботу мережі.

Результати досліджень були апробовані та представлені в науковій публікації. У цій публікації були описані методи побудови мережі на базі рою БПЛА, розглянуті різні топології мережі та їхні переваги та недоліки. Результати досліджень можуть бути використані як основа для подальших

досліджень та розробок у цій області, а також для практичного впровадження високомобільних комп'ютерних мереж на базі рою.

А. М. АФНАСЬЄВА

магістр кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0006-4622-8053

В. М. ТКАЧОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-6524-9937

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ВИСОКОМОБІЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ РОЮ БПЛА

Існує чимала кількість переваг використання безпілотних літальних апаратів для побудови мереж на великій території в порівнянні з існуючими рішеннями. А у зв'язку зі збільшенням популярності та використання безпілотних літаючих апаратів (далі – БПЛА), виникають нові проекти, спрямовані на вивчення поточних проблем, які, теоретично, можуть бути вирішені за допомогою дронів або роїв дронів.

БПЛА володіють великою мобільністю, оскільки вони можуть легко переміщатися на великі відстані. Це означає, що їх можна швидко розгорнути та переносити з одного місця на інше в залежності від потреб мережі. Наприклад, у випадку зміни топографії або виникнення нових вимог до покриття зв'язку, БПЛА можуть бути легко перенесені в нові місця для оптимального покриття. Однією з ключових переваг використання БПЛА є їхній потенціал для автономної роботи. Вони можуть бути запрограмовані для виконання різних завдань без значного людського втручання. Наприклад, вони можуть автоматично відслідковувати стан мережі та, у випадку виявлення проблем або відмови, самостійно виправляти ситуацію шляхом відновлення зв'язку або переорієнтації. БПЛА мають здатність переміщатися у тривимірному просторі, що дозволяє їм забезпечувати покриття на широкій території порівняно з традиційними методами. Це дозволяє створювати мережі з більш широким охопленням та забезпечувати доступ до зв'язку в регіонах, де раніше це було складним або неможливим.

Проте створення мережі з безпілотних літальних апаратів може зіткнутися з рядом недоліків та складнощів. Спочатку, складність конфігурації може бути значним викликом. Налаштування мережі з БПЛА вимагає розуміння принципів роботи кожного дрона, вибір відповідної технології зв'язку та налаштування параметрів мережі. Це може вимагати значних зусиль і часу від кваліфікованих фахівців. Також, обмежена пропускна здатність може бути проблемою, особливо при передачі великої кількості даних. Залежно від технології зв'язку та кількості дронів у мережі, може виникнути обмеження на пропускну здатність мережі, що може обмежити її ефективність. Крім того, вартість впровадження та підтримки мережі з БПЛА може бути великою. Додатково, потрібно мати на увазі недостатню стійкість до перешкод. Залежно від середовища, в якому працюють дрони, можуть виникати проблеми зі стійкістю зв'язку через перешкоди, електромагнітні спотворення або інші фактори, що можуть погіршити продуктивність мережі. Ще виникає питання щодо потенційних загроз безпеки. Мережі з БПЛА можуть бути уразливі до кібератак, перехоплення сигналів або фізичних пошкоджень, що може призвести до втрати контролю над дронами або витоку конфіденційної інформації.

Тож, хоча мережі, побудовані роєм БПЛА стикаються з рядом викликів і обмежень, що потребують уважного вивчення та розв'язання, вони мають значний потенціал і переваги. Дослідження способів оптимізації конфігурації, забезпечення надійності та зменшення вартості впровадження таких мереж буде корисним для подальшого розвитку цієї технології. Такий підхід дозволить максимально використовувати потенціал мереж БПЛА та забезпечити їх успішне впровадження в різноманітних областях застосування.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БПЛА), мобільність, модель з'єднання, керуюча станція, конфігурація мережі, стійкість до перешкод, високомобільна мережа.

Рисунок 4.1 – Апробація результатів досліджень в публікації

4.2 Переваги реального тестування високомобільної мережі на базі рою БПЛА

У створенні високомобільної мережі на базі рою БПЛА були виявлені проблеми, пов'язані з неможливістю проведення повноцінного тестування в реальних умовах через поточні обмеження та обставини. Хоча існують сценарії, які можуть бути протестовані в контрольованих середовищах, відтворення реальних умов зустрічає значні труднощі.

Проте, якби була можливість протестувати створення високомобільної мережі на базі рою БПЛА в реальних умовах, це могло би принести кілька значних змін та переваг.

По-перше, реальне тестування дозволило б оцінити реальну продуктивність та ефективність системи в різних сценаріях. Це дало б можливість виявити потенційні проблеми та вдосконалити алгоритми, що використовуються для координації та комунікації між вузлами.

По-друге, реальне тестування дозволило б оцінити вплив різних факторів, таких як погодні умови, перешкоди та інші зовнішні фактори, на роботу системи. Це дало б можливість вдосконалити алгоритми автономного управління та адаптації системи до змінних умов.

По-третє, реальне тестування дозволило б оцінити взаємодію рою БПЛА з іншими системами та пристроями, такими як мережі зв'язку, супутникові системи, датчики та інші. Це дало б можливість виявити потенційні конфлікти та забезпечити сумісність системи з інфраструктурою, що вже існує.

Для подальшого розвитку даної теми та отримання більш точних та об'єктивних результатів, необхідно провести протестування описаних в роботі сценаріїв на практиці та порівняти отримані результати з тими, що були отримані в модельному тестуванні. Це дозволить зробити більш обґрунтовані висновки та визначити можливі обмеження та переваги високомобільних мереж на базі рою БПЛА в реальних умовах.

Порівняння результатів реальних тестів з результатами модельного тестування дозволить виявити розбіжності та визначити, наскільки точно модель відображає реальну роботу системи. Це допоможе вдосконалити модель та зробити її більш точною та реалістичною.

Крім того, порівняння результатів реальних тестів з описаними в роботі сценаріями дозволить оцінити, наскільки ефективно та ефективно система може виконувати заплановані завдання та вирішувати проблеми, які виникають у високомобільних мережах на базі рою БПЛА.

Відсутність можливості моніторингу та контролю усіх БПЛА на одному пристрої може становити значні обмеження для ефективного управління та координації їх дій. Це особливо важливо в контексті використання БПЛА в різних сферах, таких як військові операції, цивільна авіація, дослідження та нагляд.

Створення можливості моніторингу і керування БПЛА з одного пристрою має кілька переваг, які можуть покращити ефективність та безпеку їх використання. Перш за все, створення можливості моніторингу та керування БПЛА з одного пристрою має кілька переваг, які можуть покращити ефективність та безпеку їх використання. В першу чергу, це забезпечує централізований доступ до всіх БПЛА, що дозволяє операторам отримувати повну картину ситуації та здійснювати контроль над кожним апаратом з одного місця. Це спрощує процес прийняття рішень та дозволяє операторам швидко реагувати на зміни у ситуації.

Ще одним важливим аспектом є можливість координації дій між різними БПЛА. Оператори можуть встановлювати спільні цілі та стратегії для групи апаратів, а також визначати їхні ролі та завдання. Це дозволяє досягати більшої ефективності та точності виконання завдань, особливо в складних умовах або великих масштабах.

Третім аспектом є забезпечення безпеки польотів. Завдяки можливості моніторингу та керування з одного пристрою, оператори можуть відстежувати стан кожного БПЛА, включаючи його місцезнаходження, статус батареї,

температуру та інші параметри. Це дозволяє вчасно виявляти можливі проблеми та приймати відповідні заходи для їх усунення, що зменшує ризик аварій та збільшує надійність БПЛА.

Крім того, це також сприяє зручності та економії часу. Операторам не потрібно перемикатися між різними пристроями або програмами для моніторингу та керування кожним БПЛА окремо. Замість цього, вони можуть використовувати один уніфікований інтерфейс, що спрощує роботу та зменшує ймовірність помилок.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було проведено аналіз проблем, пов'язаних з побудовою та експлуатацією високомобільних комп'ютерних мереж. Були розглянуті різні стратегії побудови та топології мережі, а також вивчено доцільність використання рою БПЛА для побудови таких мереж.

Для попереднього моделювання та тестування системи перед реальною побудовою та експлуатацією був розроблений спеціальний додаток. Цей додаток дозволяє відтворити різні сценарії та ситуації, включаючи випадки виходу з ладу одного або кількох БПЛА.

Використання спеціального додатку для попереднього моделювання та тестування системи перед реальною побудовою та експлуатацією є надзвичайно важливим та ефективним підходом. Переваги використання такого додатку полягають у можливості оцінити працездатність та ефективність системи ще до її фізичної реалізації. Це дозволяє виявити потенційні проблеми та недоліки в дизайні та конфігурації мережі, а також визначити оптимальні параметри та налаштування.

Додаток для попереднього моделювання та тестування також дозволяє здійснити аналіз різних варіантів розташування БПЛА та їхньої взаємодії. Це допомагає визначити оптимальну топологію мережі та стратегії комунікації між БПЛА, що сприяє покращенню продуктивності та надійності системи.

Крім того, використання додатку дозволяє здійснити тестування різних сценаріїв та ситуацій, включаючи випадки виходу з ладу БПЛА. Це дозволяє оцінити реакцію системи на такі непередбачені події та розробити відповідні стратегії відновлення та управління.

Аналізуючи результати моделювання та тестування, можна зробити висновок, що метод самовідновлення високомобільної комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА є ефективним. Завдяки використанню рою БПЛА, можливо

забезпечити гнучкість та мобільність мережі, а також забезпечити надійність та стійкість роботи навіть у випадку виходу з ладу окремих БПЛА.

Цей метод виявляється особливо корисним у ситуаціях, де потрібно забезпечити покриття мережі в складних територіальних умовах або в умовах, коли доступність традиційних засобів зв'язку обмежена. Використання рою БПЛА дозволяє швидко розгортати та налаштувати мережу, а також забезпечує можливість автоматичного виявлення та відновлення в разі виникнення проблем.

Самовідновлення високомобільної комп'ютерної мережі на базі рою БПЛА є перспективним та ефективним рішенням. Використання цього методу може допомогти покращити якість та надійність зв'язку в мобільних мережах, забезпечити гнучкість та швидкість розгортання, а також забезпечити стійкість роботи навіть у випадку виникнення проблем з окремими БПЛА.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Афанасєва А.М, Ткачов В.М. Порівняльний аналіз методів побудови високомобільних комп'ютерних мереж на базі рою БПЛА : Вісник Херсонського національного технічного університету 1(88) 2024; 191-196 с.
2. Afanasieva A.M., Tkachov V.M. Comparing rechart and victory libraries for data visualization in react: pros and cons : матеріали 27-го міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» Харків 2023 87-88 с.
3. Afanasieva A.M., Tkachov V.M. Exploring 3d graphics in react. An overview of Three.js and react-three fiber : матеріали 27-го міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» Харків 2023 85-86 с.
4. Mozaffari, M.; Saad, W.; Bennis, M.; Merouane, D. Mobile Internet of Things: Can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture? In Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Washington, DC, USA, 4–8 December 2016; pp. 1–6.
5. M. Hunko, V. Tkachov, A. Kovalenko, and H. Kuchuk, “Advantages of fog computing: A comparative analysis with cloud computing for enhanced edge computing capabilities,” : 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), pp. 1–5, IEEE, 2023.
6. V Tkachov Cellular Technology Based Overlay Networks for the Secure Control of Intelligent Mobile Objects: Models and Numerical Study/ V Tkachov, A Kovalenko, V Kharchenko, M Hunko : ICTERI 2021: Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. – Kherson, Ukraine, October 2, 2021. – Pp. 42-63.
7. Zeng, Y.; Zhang, R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization. IEEE Trans. Wirel. Commun. 2017, 16, 3747–3760.
8. V Tkachov Cellular Technology Based Overlay Networks for the Secure

Control of Intelligent Mobile Objects/ V Tkachov, A Kovalenko, V Kharchenko, M Hunko : ICTERI 2021: Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. – Kherson, Ukraine, October 2, 2021. – Pp. 480-490.

9. Yanmaz, E.; Yahyanejad, S.; Rinner, B.; Hellwanger, H.; Bettstetter, C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing. *Ad Hoc Netw.* 2018, 68, 1–15.

10. M Hunko. Application Architecture For Obtaining Data From Scientometric Databases / M Hunko, V Tkachov, O Liashenko, J Rabčan : 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – Kharkiv, 2022.

11. Tkachov V. Principles of Constructing an Overlay Network Based on Cellular Communication Systems for Secure Control of Intelligent Mobile Objects / Vitalii Tkachov, Andriy Kovalenko, Mykhailo Hunko and Kateryna Hvozdetzka : Информационные технологии и безопасность. Материалы XIX Международной научно-практической конференции ИТБ-2020. – К.: ООО "Инжиниринг", 2020. – С. 51-55.

12. Cheng, F.; Zhang, S.; Li, Z.; Chen, Y.; Zhao, N.; Yu, F.R.; Leung, V.C. UAV trajectory optimization for data offloading at the edge of multiple cells. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2018, 67, 6732–6736.

13. Tkachov, V. M., and D. V. Hrechmak. "The advancements and impacts of cloud computing: abstraction, innovation, and sustainability." (2023).

14. Vitalii Tkachov, Mykhailo Hunko, Olga Morozova, Artem Tetskyi, Andrii Nicheporuk "Method to Determine Fault-Tolerant Performance Probability of High-Survivability Computer Network based on Mobile Platform" : 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T).

15. M Hunko, V Tkachov, A Kovalenko " Advancements in edge and fog computing in limited Internet connectivity and real-time data requirements" - Проблеми інформатизації : одинадцята міжнародна науково-технічна конференція – Харків 2023 – с.41.