

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО
“ _____ ” _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР

Тема: «Адаптивний алгоритм маршрутизації для мереж управління БПЛА»

Виконавець: _____ Євген ШЕВЧЕНКО

(підпис)

Керівник: _____ Володимир КЛИМЧУК

(підпис)

Нормоконтролер: _____ Денис БАХТІЯРОВ

(підпис)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ _____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Шевченка Євгена Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Адаптивний алгоритм маршрутизації для мереж управління БПЛА»

затверджена наказом ректора від «29» березня 2023 р. № 421/ст

2. Термін виконання роботи: з 22.05.2023 р. по 25.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: аналіз управління БПЛА

4. Зміст пояснювальної записки:; алгоритм маршрутизації (ПЦЗД) для БПЛА; розрахунок маршрутизатора IEEE 802 з алгоритмом ПЦЗД

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація в програмному пакеті Microsoft PowerPoint на 9 слайдів

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	22.05.2023- 24.05.2023	Виконано
2	Вступ	25.05.2023	Виконано
3	Розділ 1. Аналіз задач управління БПЛА	26.05.2023- 28.05.2023	Виконано
4	Розділ 2. Аналіз існуючих алгоритмів маршрутизації в задачах управління БПЛА. Недоліки існуючих алгоритмів.	29.05.2023- 05.06.2023	Виконано
5	Розділ 3. Принцип побудови, особливості та дослідження запропонованого алгоритму маршрутизації	06.06.2023- 14.06.2023	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.06.2023- 25.06.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: “19” травня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Володимир КЛИМЧУК
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Євген ШЕВЧЕНКО
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Адаптивний алгоритм маршрутизації для мереж управління БПЛА»

Містить 77. сторінок, 24 рисунки, 1 таблиці, 29 використаних джерел.

БЕЗДРОВОТІ МЕРЕЖІ, ОБМІН ДАНИМИ, БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЮЧІ АПРАТИ, МОДЕЛЬ, ПРОТОКОЛИ ОБМІНУ ДАНИМИ, АНАЛІЗ, МАРШРУТИЗАЦІЯ, FLYING AD HOC NETWORK, MOBILE AD HOC NETWORK.

Об'єкт дослідження: модифікований протокол статистичної маршрутизації для БПЛА, протокол централізованого збору даних (ПЦЗД).

Мета роботи: дослідження та розгляд всіх можливих методи маршрутизації, недоліки та переваги кожного з них. Вибрати та дослідити найкращий із маршрутизаторів для БПЛА. Довести чому саме він найкращий у теперішній час.

Предмет дослідження: маршрутизатор IEEE 802.11.n з алгоритмом протоколу ПЦЗД.

Предмет дослідження: найпоширеніший маршрутизатор для БПЛА IEEE 802.11n

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при побудові сучасних ударних та розвідувальних БПЛА

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. Аналіз задач управління БПЛА	10
1.1 Основна відмінність дрону від БПЛА.....	10
1.2 Історія розвитку БПЛА в цивільному житті.....	10
1.3 Історія розвитку БПЛА у військовому застосуванні.....	11
1.4 Види БПЛА.Які вони бувають, їх особливості.....	12
1.4.1 Мікро- та нанодрони.....	12
1.4.2 Малі тактичні дрони.....	13
1.4.3 Тактичні БПЛА.....	13
1.4.4 Великі ударні безпілотники.....	14
1.5 Типи польотів БПЛА	15
1.5.1 Мультироторні БПЛА.....	15
1.5.2 БПЛА з нерухомим крилом.....	15
1.5.3 Однороторний дрон.....	15
1.5.4 Гібридні дрони.....	16
1.6 Застосування БПЛА.....	17
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	20
РОЗДІЛ 2. Аналіз існуючих алгоритмів маршрутизації в задачах управління БПЛА. Недоліки існуючих алгоритмів	21
2.1 Маршрутизація в БПЛА.....	21
2.2 Мобільні спеціальні мережі MANET.....	21
2.2.1 Маршрутизація в мережах MANET.....	21
2.2.2 Вибір стабільних шляхів маршрутизації у мережі MANET.....	22

2.3 Літаючі спеціальні мережі (FANET)	28
2.3.1 Особливості мереж FANET	28
2.4 Мобільні спеціальні мережі (FANET).....	30
2.4.1 Статичні протоколи маршрутизації	31
2.4.2 Проактивні протоколи маршрутизації	36
2.4.3 Реактивні протоколи маршрутизації	39
2.4.4 Гібридні протоколи маршрутизації	42
2.4.5 Гібридні протоколи маршрутизації.....	45
2.4.6 Ієрархічні протоколи маршрутизації.....	47
2.5 Порівняльна характеристика протоколів FANET	48
ВИСНОВКИ ДО РОДІЛУ 2.....	50
РОЗДІЛ 3. Принцип побудови, особливості та дослідження	
запропонованого алгоритму маршрутизації	51
3.1 Протокол маршрутизації централізованого збору даних (ПЦЗД).....	51
3.2 Аналіз моделей мобільності мереж FANET.....	53
3.3 Адаптивний підхід до руху БПЛА з точки зору обходу перешкод	58
3.4 Функція енергетичної обізнаності	62
3.5 Висновки щодо енергоефективності в БПЛА	63
3.6 Дослідження маршрутизатора IEEE 802	65
ВИСНОВКИ ДО РОДІЛУ 3.....	70
ВИСНОВОК	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літаючий апарат.

БССМ – базова станція стільникової мережі.

КПО – коефіцієнт природного освітлення.

ММ – модель мобільності.

ПГМ – протокол гібридної маршрутизації.

ПДМД – протокол динамічної маршрутизації джерела.

ПЗТД – протокол завантаження та доставки.

ППВВ – протокол «призначення-послідовний вектор відстаней».

ПБРІМ – протокол багаторівневої ієрархічної маршрутизації.

ПЦЗД – протокол централізованого збору даних.

ПРМ – протоколи реактивної маршрутизації.

ПМЗ – протокол маршрутизації зон.

ПОЛЗ – протокол оптимізації лінії зв'язку.

ПОПМ – протокол обмеженої периметральної маршрутизації.

СДИЗ – протокол спеціального дистанційного вектора за запитом.

ТВАМ – тимчасово впорядкований алгоритм маршрутизації.

DEN – (англ. Delay Tolerant Networking) – мережі стійкі до затримок.

FANET – (англ. Flying Ad Hoc Network) – літаючі спеціальні мережі.

MANET – (англ. Mobile Ad Hoc Network) – мобільні спеціальні мережі.

VANET – (англ. Vehicular ad-hoc networks) – автомобільні спеціальні мережі.

ВСТУП

Актуальність теми моєї кваліфікаційної роботи наразі дуже високий, тому що Україна, як і країна-агресор, з першого дня російського вторгнення на практиці використовує безпілотники: збирає розвіддані та виконує бойові завдання. У мережі неодноразово з'являлися відео, як наша армія успішно знищує російську техніку за допомогою безпілотників, і не тільки техніку. В окупованому Криму знищення стратегічних цілей також часто відбувається за допомогою великих ударних безпілотників, у яких попередньо запрограмовані маршрутизатори за координатами. Нинішню війну називають погонєю за технологіями, підкреслюючи роль дронів. Порахувавши безпілотники, ми виграємо війни, – кажуть військові.

Іншим не менш важливим фактором є забруднення навколишнього середовища. Це одна з причин забруднення навколишнього середовища в світі і є фактором ризику захворювань і раптової смерті. Аналізуючи дослідження світових вчених за останні десять років, можна сказати, що шоста частина людей щорічно помирає від хвороб, спричинених навколишнім середовищем. Вплив забруднення токсичними хімікатами дуже великий. Через це з кожним роком зростає смертність від хімічних причин. Отже, можна зробити висновок, що моніторинг стану довкілля є і залишатиметься актуальною проблемою сьогодення в найближ

Після зухвалого нападу російських агресорів на Україну наша держава не лише бореться з ворогами на передовій, а й бореться з наслідками цієї страшної війни. Аналізуючи дослідження українських науковців, можна сказати, що тема виявлення та боротьби з негативними факторами, що впливають на стан водного та лісового господарства країни, набуває все більшої актуальності. Оскільки зловмисники, які окупували нашу територію, не можуть дістатися до дослідницьких об'єктів, в якості засобів контролю

використовуються безпілотні літальні апарати різного призначення та спеціалізації, так звані дрони. Але зараз особливо важливі великі дрони, на них можна розмістити до 400 кг вибухівки. Завдяки цьому безпілотнику вдалося знищити ворожі склади з боєприпасами за тисячі кілометрів від оператора. Якщо з економічної точки зору порівнювати ракети з ударними безпілотниками, то за ціною однієї ракети можна зробити 13 ударних безпілотників.

Мета роботи: Дослідження та розгляд всі можливі методи маршрутизації, недоліки та переваги кожного з них. Вибрати та дослідити найкращий із маршрутизаторів для БПЛА. Довести чому саме він найкращий у теперішній час.

Об'єктом дослідження: протокол маршрутизації централізованого збору даних (ПЦЗД). Цей протокол є статичним протокол який модифікований для БПЛА, який має високий відсоток доставлених пакетів між БПЛА та оператором.

Предмет дослідження: найпоширеніший маршрутизатор для БПЛА IEEE 802.11n

Практичне значення отриманих результатів. Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при побудові сучасних ударних та розвідувальних БПЛА

Апробація отриманих результатів. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

Науково-практична волонтерська конференція «Проблеми недостачі безпілотних латаючих апаратів для бойових дій», м. Київ, 2023 р.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ БПЛА

1.1. Основна відмінність дрону від БПЛА

БПЛА інтерпретуються як безпілотні літальні апарати, які можуть літати без екіпажу, дистанційно керуватися за допомогою пульта дистанційного керування або слідувати запрограмованим маршрутом і бути повністю автономними. БПЛА – це технічний термін, який експерти та професіонали віддають перевагу безпілотникам.

Що ж, давайте все ж таки розберемося чим відрізняється БПЛА від дрону [1].

Дрон - це будь-який мобільний і компактний безпілотний транспортний засіб, тобто апарат без екіпажу, запрограмований на виконання певного завдання в повітрі, на суші або навіть під водою. Бо саме такі розробки використовують для визначення військової машини, але нині дрони більш «дружні» та доступні кожному з нас. Тому можна сказати, що термін «дрон» - це не тільки сучасний квадрокоптер, а й океанський підводний гелікоптер, за допомогою якого можна спостерігати за підводним світом, або наземний повністю автоматичний апарат, а також розважальний автомат з дистанційним керуванням [1].

Як випливає з назви, безпілотний літальний апарат - це безпілотний літальний апарат, який використовується тільки в повітрі. Вони також відрізняються за розміром і вагою, і вони більші за дрони. Застосування БПЛА в цивільному житті та військових цілях стає все більш широким. Загалом ці два терміни подібні, але використання двох термінів і сфера їх застосування мають бути різними [1]

1.2. Історія розвитку БПЛА в цивільному житті

У 1849 році австрійська повітряна куля увійшла в історію як перший безпілотний літальний апарат, розроблений спеціально для повітряних бомбардувань. Це робить його дідусем сучасного дрона.

Походження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) можна простежити до відкриття електроніки та радіозв'язку. Цікаво, що піонерами в цій галузі були давні вороги маловідомих учених: Томас Едісон і Нікола Тесла. Едісон представив свій перший прототип у 1892 році, і він був досить примітивним порівняно з сучасними безпілотниками. Це дротовий пульт дистанційного керування, якому бракує вишуканості. З іншого боку, до 1898 року Тесла розробив більш досконалий безпілотний літальний апарат, яким можна було керувати дистанційно за допомогою радіосигналів.

У 1910 році інженер Чарльз Кеттерінг застосував нетрадиційний, але інноваційний підхід до проектування літаків - його метою було використовувати годинниковий механізм як засіб керування обладнанням. Завдяки здатності планувати крила безпілотника, щоб приземлитися в певний момент і атакувати ворога, концепція заінтригувала Сполучені Штати, які вирішили інвестувати в її розробку. Незважаючи на кілька успішних випробувальних польотів, проект зрештою провалився, оскільки він не досяг бажаного рівня точності. Малосерійне виробництво і вузька спеціалізація відрізняють цивільні дрони від військових. З'явившись лише у 2000-х роках, ці елегантні машини захопили споживчий ринок своєю передовою технологією. Їх унікальність дозволяє інженерам швидко задовольняти мінливі пріоритети та потреби клієнтів. Можливості деяких стартапів здивували навіть скептиків, оскільки вони вже конкурують зі службами доставки і в майбутньому можуть серйозно замінити малу авіацію [1].

1.3. Історія розвитку БПЛА у військовому застосуванні

Конкуруючі інженери в Німеччині та США під час Першої світової війни зосередили свою увагу на безпілотних літальних апаратах, або дронах, з метою створення найкращого військового інструменту. Раніше ці пристрої використовувалися для військових цілей, але їх розвиток тривав роками. У 1915 році американські інженери-дрони досягли вражаючого досягнення, створивши апарат, який міг нести до 450 кілограмів вибухівки. Хоча цей конкретний безпілотник ніколи не використовувався в бойових діях, він все одно виявився безцінним для використання в майбутньому [1].

У період між двома великими війнами інженери випробовували кілька методів як запуску, так і посадки безпілотних літальних апаратів. Від звільнення з літаків до використання катапульти і навіть спроб торкнутися води за допомогою парашутів.

1.4. Види БПЛА

Перш за все, за якістю БПЛА поділяються на малі, середні та важкі. Ця класифікація допоможе відразу визначити його основне використання. Далі ми більш детально розглянемо класифікацію дронів. Для більшості завдань найбільшу ефективність демонструють малі БПЛА вагою до 30 кг. Їх обрали за мобільність, економічність і зручність використання. Вони не вимагають особливих умов зберігання і місць зльоту, тому більш мобільні. Реєстрація та облік таких літаків також спрощені порівняно з більш важкими безпілотниками.

1.4.1. Мікро- та нанодрони

Мікродрони — це майже кишенькові дрони, розміром приблизно з велику комаху. Найвідомішим міні-дроном є модель Black Hornet від норвезької компанії Prox Dynamics, яка має розміри трохи більше 100 мм в довжину і 25 мм в ширину. Британські військові використовують їх у війні в Афганістані з 2013 року. Вони допомагали зрозуміти, що відбувається за стіною, де ховався суперник [1]. Весь комплект для роботи з дроном важить 1,3 кг і включає пульт для керування однією рукою, док-станцію та акумулятори. Black Hornet Micro Drone може літати до 25 хвилин на одному заряді або 2,5 години без підзарядки, використовуючи додатковий блок живлення, який входить у комплект. БПЛА має радіус дії до одного кілометра та швидкість 5 м/с. Моделі Black Hornet можуть бути оснащені двома камерами, пристроєм нічного бачення та пристроєм інфрачервоного випромінювання [1].

Схожість чорного шершня з комахами або птахами дозволяє йому добре маскуватися, а завдяки невеликим розмірам і маленьким лопатям гвинта він дуже тихий у польоті. Крім того, це один із небагатьох дронів, який може працювати повністю в приміщенні [1].

1.4.2. Малі тактичні дрони

Дрони, які вже важко приховати, мають деякі важливі відмінності та сценарії використання. Дрони більше не можна ховати в кишені, але вони можуть літати до 12 годин без підзарядки і мають радіус дії до 90 кілометрів. Флагманським представником цього класу є безпілотник-розвідник Fulmar. Країна виробник - Thales Франція. Завдання, для якого він найкраще підходить, це збір розвідданих [1]. Однокласником французького безпілотника є модель Aladin німецької компанії EMT Penzberg, але з меншим радіусом дії – всього 15 кілометрів. Армія США віддає перевагу моделі Raven виробництва AeroVironment. Raven можна запустити в повітря помахом руки, а дрон з електродвигунами має радіус близько 10 кілометрів. Він може виконувати

команди з землі або працювати в автономному режимі, тобто за допомогою маршрутизаторів із запрограмованими координатами. Зазвичай такі безпілотники призначені для збору даних, а їхні розміри та льотні характеристики найбільше підходять для розвідувальних операцій [1].

1.4.3. Тактичні БПЛА

Більшість військових дронів є середніми або тактичними. Це «робочі конячки» сучасних армій світу. У США їх скорочено називають «MALE» — дрон, здатний працювати на середніх висотах протягом тривалого періоду часу, або «HALE» — на великих висотах [1]. У цій категорії одним з флагманів є модель Heron, яка випускається ізраїльською компанією Israel Aerospace Industries. Чапля може літати 52 години на висоті 10 кілометрів. Він важить більше тонни, а розмах крил становить 16 метрів. Такі безпілотники знаходяться на озброєнні таких країн: США, Австралія, Марокко, Туреччина, Індія та Канада [1]. Німецька армія використовувала модель Luna виробництва EMT. БПЛА цього типу використовувалися в Афганістані та Косово з початку 2000-х років, але вони мають величезний недолік, обмежений радіусом дії 100 км, що є недостатнім для розвідувального безпілотника [1].

1.4.4. Великі ударні безпілотники

Мабуть, найвідомішими та найефективнішими військовими безпілотниками є більші літаки армії США. Моделі таких дронів включають Predator і його старшого брата Reaper. Вони були продані General Atomics за 16,9 мільйонів доларів кожен [1]. «Жнець» має дальність польоту до 1000 кілометрів і час польоту до 14 годин, він може нести різноманітні керовані ракети для ураження наземних цілей. Крім Сполучених Штатів, кілька інших країн НАТО, включаючи Іспанію, Францію та Великобританію, використовують подібні безпілотники. Як і Reaper, китайська модель CN-4 використовувалася єгипетською та іракською арміями [1]. Модель Global

Hawk виробництва Northrop Grumman вважається найбільшим і найдорожчим БПЛА. Один такий дрон коштує 130 мільйонів доларів, не враховуючи допоміжну інфраструктуру на землі. Global Hawk літає вище звичайних цивільних літаків – до 18 000 метрів.

У більшості випадків такі дрони використовуються для спостереження за районами збройних конфліктів, але основне їхнє призначення інше – такі дрони можуть глушити та перехоплювати сигнали мобільного зв'язку. Поки що тільки Northrop Grumman виробляє БПЛА подібного розміру та можливостей, але очікується, що найближчим часом вони складуть конкуренцію БПЛА серії CH, які виробляє China Aerospace Science and Technology Corporation [1].

1.5. Типи польотів БПЛА.

Для того щоб БПЛА піднявся в повітря, конструктори використовують кілька ефективних та перевірених часом способами.

1.5.1. Мультироторні БПЛА.

Тут виникає питання, що таке дрон, люди схильні уявляти його як звичайний цивільний дрон з пропелерами або мультироторами. Багатороторні дрони є найпоширенішим типом. Є дрони з 3, 4, 6, 8, 12 двигунами з пропелерами. У польоті вони зберігають горизонтальне положення відносно поверхні Землі, можуть десь зависати, рухатися з боку в бік, вперед-назад, з боку в бік, повертатися навколо своєї осі. Зробіть це, змінюючи силу тяги в кожному двигуні [1].

1.5.2. БПЛА з нерухомим крилом.

Дрон, який використовує крила для польоту та створення підйомної сили, як і звичайний літак. Вони не можуть зависати в повітрі, але можуть

рухатися вперед за заданим маршрутом, якщо дозволяють їхні сили. Цей дрон економічніший, швидший і призначений для моніторингу великих територій.

1.5.3. Однороторний дрон.

Безпілотний вертоліт, за конструкцією схожий на справжній вертоліт. На відміну від багатороторних дронів, вони мають великий ходовий гвинт і малий хвостовий гвинт для контролю курсу. Ефективніше мультироторів: більший час польоту, може працювати на двигунах внутрішнього згорання. Але через те, що конструкція складніша, експлуатаційні витрати вищі [1].

1.5.4. Гібридні дрони.

Безпілотний літальний апарат, який поєднує в собі переваги моделі з нерухомим крилом (наприклад, довший час польоту) з перевагами моделі на основі гвинта (наприклад, можливість зависання). Конструкції гібридних літаків існують з 1960-х років, але на той час вони не мали особливого успіху. Проте з появою нового покоління датчиків (гіроскопів і акселерометрів) гібридні структури отримали нове життя і напрямок [1].

1.6. Застосування БПЛА.

Найважливіша особливість дронів полягає в тому, що вони знаходять все більше сфер застосування. Сьогодні BPLA активно використовується в різних сферах діяльності: Сільськогосподарські дрони. Сільське господарство є одним із найперших видів діяльності, де використовувалися технології дистанційного зондування Землі ще в середині минулого століття. Раніше для комплексної оцінки земель і прогнозування врожайності використовували аерофотозйомку з пілотованих літальних апаратів, а пізніше з космічних супутників [1]. Одним з найбільш вимогливих напрямків сільськогосподарських робіт є оцінка стиглості плодів і загального стану

рослини. Другий спосіб застосування дронів у сільському господарстві – обприскування рослин і плодових дерев вітамінами та різними отрутами для шкідників [1].

Електричні дрони. Безпілотники вже засвоюють енергетику. Аналіз довгих лінійних об'єктів за допомогою БПЛА. Безпілотники допомагають локалізувати пошкоджені лінії електропередач, швидко виявляти аварійні ситуації, деформовані опори. За допомогою спеціальних ультрафіолетових датчиків дрон може визначати координати коронного розряду на лінії електропередач. Мені здається, що між стовпами, розділеними природними перешкодами, використовуються спеціальні мультикоптери. Крім того, дрони також можна використовувати для тепловізійного контролю силових компонентів і високовольтних ліній, аналізу провисання проводів [1].

БПЛА використовується для геодезії та кадастру. Для створення бібліотеки місцевості було виконано аерофотозйомку високої роздільної здатності з точними координатними прив'язками. На основі цього створено ортофотокарту та 3D модель місцевості. Спеціальні БПЛА призначені для встановлення корисного навантаження та обладнання, що дозволяє виконувати поставлені завдання [1].

БПЛА в нафті та газі. У нафтовій і газовій промисловості дрони можуть виконувати широкий спектр робіт. Найбільш перспективним є використання безпілотників для регулярних польотів для чергування території трубопровідної системи. Безпілотники, оснащені камерами та тепловізором, можуть швидко виявляти аварії на трубопроводах, розливи нафтопродуктів, незаконні рубки, лісові та торфовищні пожежі в районах проходження трубопроводів. На основі знахідок створено спільний фотопроект та карту з точним розташуванням важливих об'єктів [1].

Безпілотники також використовуються для перевірки сховищ палива та факельних труб під час планування та підтримки будівництва з метою екологічного контролю. Дрони у видобутку. Геологи за допомогою дронів

проводять детальну оцінку місцевості: визначають місцевість, характер ґрунтової аномалії та отримують інформацію про те, як найбільш ефективно підібрати бурове обладнання до потрібної точки [1]. Здатність дронів аналізувати рельєф у важкодоступних для людей місцях робить ці пристрої незамінними в цій галузі. Дрони безпечні. Служби безпеки давно використовують дрони. Вони не тільки ведуть аероспостереження, а й відстежують рухомі об'єкти та супроводжують їх на всьому шляху. Вони зазвичай використовуються для спостереження за людьми або оцінки рівня безпеки об'єктів [1].

Дрони в армії та поліції. Правоохоронні органи, такі як військові та поліція, використовують дрони для звичайного патрулювання, доставки екстрених вантажів у важкодоступні райони та захисту об'єктів і колон. Безпілотники також використовуються у бойових діях. Часто малогабаритні дрони використовують як засіб для ведення розвідки місцевості. У завдання цього безпілотника входить коригування артилерійського наведення, аеророзвідка, отримання новітньої космічної інформації, радіоелектронна розвідка, ретрансляція систем зв'язку. Для правоохоронних органів потрібні надійні та невибагливі дрони, оснащені складним багатофункціональним обладнанням. Пристрої, які використовуються правоохоронними органами, повинні бути добре захищені від зовнішніх фізичних впливів і від «перешкод» для управління та збору інформації [1]. Цивільні дрони з камерами часто використовуються у військових і поліцейських цілях, оскільки вони найкраще підходять для розвідки.

БПЛА в будівництві. Дрони дозволяють контролювати процес будівництва, коригувати та оперативно виявляти помилки в технології будівництва об'єкта, а також отримувати інформацію для розробки плану подальших робіт. Камера дає чіткі знімки для аналізу ситуації [1]. Для доставки інструментів або будівельних матеріалів на землю будуть використовуватися важкі вантажні дрони. Лісові дрони. Малі розміри та

висока мобільність дронів дозволяють легко використовувати їх у лісовому господарстві: для оцінки територіальних умов, визначення точок спалаху, документування популяцій диких тварин та цінних порід дерев. Швидкість дронів дає змогу виявляти браконьєрів, запобігати вирубці лісів та незаконному полюванню на тварин [1].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Безпілотні літаючі апарати вони ж БПЛА, вже давно беруть участь у технологічних перегонах і непомітно увійшли до нашого звичайного застосування у життя. На мою думку, справедливо буде сказати, що безпілотні технології мають величезні перспективи, і не лише у військовому плані, а й в цивільному житті. Досить розвинені технології БПЛА зможуть замінити пілотів як на полі бою, так і в цивільній авіації. Якщо на війні це збереже людські життя, то у мирний час ця технологія дозволить виключити людський фактор авіакатастроф. Розвиток БПЛА тісно пов'язаний із роботизацією всіх сфер життя, від доставки вантажів до громадського транспорту. В економічній ефективності цих змін немає жодних сумнівів.

Проведемо невеликий висновок. Проаналізувавши області застосування дронів можливо зробити висновок, що ця техніка є абсолютно різною починаючи від призначення до виробника, але її об'єднує важливість у сучасному житті завдяки функціоналу, який забезпечує інформацією та можливістю контролю екологічних проблем, а саме головне – запобіганню катастроф і тим самим зберігає людські життя. Використання безпілотників в Україні стало звичним явищем. Мета нашого подальшого дослідження – це знайти оптимальний алгоритм маршрутизації.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ БПЛА. НЕДОЛІКИ ІСНУЮЧИХ АЛГОРИТМІВ.

2.1. Маршрутизація в БПЛА

Маршрутизатор для БПЛА - це електричний пристрій за допомогою якого можна запрограмувати БПЛА на координати, і в подальшому цей безпілотник зможе літати без втручання оператора.

2.2. Мобільні спеціальні мережі MANET

Мобільна спеціальна мережа — це спеціальна бездротова мережа, і кожен вузол мережі є незалежним, який одночасно є маршрутизатором і хостом. Топологія цих мереж не є постійною, і окремі вузли спілкуються один з одним для передачі інформації. Мережі Mobile Ad Hoc Network працюють незалежно від наявності чи відсутності будь-якої мережевої інфраструктури.

Особливості мобільних спеціальних мереж:

- динамічна топологія;
- багатотокова адресація;
- розподіл операцій;
- незалежні вузли [2].

2.2.1. Маршрутизація в мережах MANET

Існує два типи маршрутизації в мережі Flying Ad Hoc Network, як показано на малюнку

Глобальна система позиціонування (GPS) може використовуватися для отримання інформації про місцезнаходження. Маршрутизація з урахуванням розташування (LAR) є прикладом маршрутизації на основі географічного розташування.



Рис. 2.1. Структурна схема протоколів маршрутизації мереж Mobile Ad Hoc Network

Маршрутизація на основі енергозбереження. Для вибору найбільш вигідного маршруту в бездротовому середовищі можна використовувати маршрутизацію, яка заснована на оцінці рівнів потужності вузлів мережі. Кожен вузол у мережі підтримує кілька записів маршрутизації в таблиці маршрутизації. У цьому випадку значення в таблиці маршрутизації відповідає класу потужності вузла. Повідомлення привітання використовується для отримання значення рівня сигналу кожного вузла. Кількість записів у таблиці маршрутизації відповідає кількості доступних вузлів за допомогою рівнів

сигналу. Таким чином, кількість записів у таблиці маршрутизації дає загальну кількість вузлів мережі [2].

Мережі Flying Ad Hoc Network схожі на безпілотні сенсорні мережі тим, що вони є самоорганізованими та багатокроковими мережами. Однак топологія Flying Ad Hoc Network є більш мінливою, ніж топологія безпілотних сенсорних мереж. Протокол Flying Ad Hoc Network дозволяє йому виступати в якості магістралі сенсорної мережі та отримувати доступ до її вузлів, а також обмінюватися інформацією про точки входу Flying Ad Hoc Network. У поєднанні із завданням використання енергоефективності датчиків під час передачі даних і скорочення часу обробки даних шляхом вибору відповідних протоколів і принципів маршрутизації потрібне злиття мереж Mobile Ad Hoc Network і безпілотних сенсорних мереж. Крім того, ці дві мережі можуть забезпечити більш ефективну та надійну міжмережеву маршрутизацію в середовищі IoT. 2.2 показано основні аспекти взаємодії IoT, WSN і Flying Ad Hoc Network [8].

2.2.2. Вибір стабільних шляхів маршрутизації у мережі MANET

Щоб підвищити продуктивність протоколів маршрутизації в ad hoc мобільних мережах, необхідно зменшити кількість невдалих посилань. Мені здається, що збій посилання на шляху в основному тому, що посилання не стабільне. Тому на етапі вибору шляху протоколи маршрутизації повинні вибрати найкращий шлях з точки зору стабільності. Основна дослідницька робота, запропонована для визначення стабільності зв'язку в мобільних мережах ad hoc, базується на оцінці потужності сигналу або навантаження на вузол, або мобільності вузла, або залишкової енергії вузла.

Протоколи маршрутизації відповідають за встановлення та підтримку шляхів між джерелами та заданими координатами. Через природу мобільних ad hoc мереж збої з'єднання можуть бути спричинені вузлами, які рухаються на шляху, вузлами з низьким зарядом батареї або низькою якістю зв'язку між

двома вузлами. Мені здається, що вузол може оцінити стан каналу зв'язку зі своїми сусідами на основі потужності отриманого сигналу. За допомогою цього вимірювання можна оцінити стабільність з'єднання та визначити якість з'єднання на основі швидкості сприйнятої перешкоди. Подібним чином, зі значення мобільності вузла можна отримати тривалість життя з'єднання вузла. Високошвидкісний трафік, що проходить через вузли, може спричинити перевантаження трафіку та подальшу втрату пакетів. Оцінка цієї швидкості допомагає механізмам балансування навантаження. Мета полягає в тому, щоб збалансувати навантаження трафіку, максимізувати швидкість передачі даних і підвищити живучість мережі. Функцію вибору шляху можна визначити за наступними параметрами:

- залишкова енергія вузлів;
- ступінь мобільності вузлів;
- рівень навантаження трафіком вузла або швидкість проходу трафіку через цей вузол;
- якість зв'язку між двома вузлами.

Розглянемо аналітичну модель для обчислення стійкості шляху для мереж Flying Ad Hoc Network відповідно до визначених вище метрик. Розрахунок проводиться в три етапи:

- розрахунок на вузлі;
- розрахунок на рівні зв'язку між двома сусідніми вузлами;
- розрахунок на рівні шляху між джерелом S та пунктом призначення d (набір вузлів або суміжних зв'язків) [2].

Побудуємо аналітичну модель. Нехай шлях P_j , серед набору шляхів P між джерелом s та пунктом призначення d , вартість вибору шляху P_j (вартість шляху) $CP P_j$ формується по формулі 2.1

$$CP(P_j) = \alpha \cdot R_{RE(P_j)} + \beta \cdot R_{MD(P_j)} + \lambda \cdot R_{TL(P_j)} + \gamma \cdot R_{LQ(P_j)}, \quad (2.1)$$

де $R_{RE(P_j)}$ – рівень залишкової енергії шляху;
 $R_{MD(P_j)}$ – рівень ступеня рухливості вузла;
 $R_{TL(P_j)}$ – рівень транзитного навантаження через вузли шляху;
 $R_{LQ(P_j)}$ – рівень якості зв'язку шляхів.

Далі опишемо детально формулювання та обчислення кожного параметра на рівні вузла, посилення та шляху [2].

Розглянемо енергію вузла. Нехай RE_{n_i} залишкова енергія вузла i . Мінімальне значення залишкової енергії вузлів на шляху P_k дорівнює

$$RE(P_k) = \text{Min}[RE(n_i)]_{1 \leq i \leq N}, \quad (2.2)$$

де N – кількість вузлів на шляху P_k .

Залишкова енергія на шляху P_j обирається наступним чином

$$RE(P_j) = \text{Max}[RE(P_k)]_{1 \leq k \leq M}, \quad (2.3)$$

де M – число можливих шляхів між джерелом та пунктом призначення.

Залишок залишкової енергії на вибраному шляху P_j

$$R_{RE(P_j)} = RE(P_j) / \sum_{1 \leq k \leq M} RE(P_k). \quad (2.4)$$

Для визначення мобільності необхідно розрахувати ступінь рухливості вузла у часовому інтервалі $[t, t + \Delta t]$ за формулою 2.5

$$MD(n_i) = \alpha \frac{N_{Out}}{N_{ca}} + (1 - \alpha) \frac{N_{In}}{N_{ca}}, \quad (2.5)$$

де N_{Out} – число вузлів, які залишили зону покриття вузла i в $[t, t + \Delta t]$;

N_{in} – кількість вузлів, які приєдналися до зони покриття вузла в $[t, t + \Delta t]$;

N_{ca} – кількість вузлів у зоні покриття n_i в момент t .

a – коеф. мобільності, він приймає значення між 0 та 1. Він = 0,5 відповідно до [3].

Ступінь середньої рухливості на шляху формується по формулі 2.6

$$MD(P_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MD(n_i), \quad (2.6)$$

де N – кількість вузлів, що беруть участь у шляху.

Рівень мобільності шляху рахується за формулою 2.7

$$R_{MD(P_j)} = \text{Min}[MD(P_k)]_{1 \leq k \leq M}. \quad (2.7)$$

Навантаження вузла являє собою кількість трафіку, що проходить через цей вузол [2]. Нехай $TL n_i$ – трафік транзитного навантаження через вузол i .

Максимальне значення транспортного навантаження на шляху P_k становить

$$TL(P_k) = \text{Max}[TL(n_i)]_{1 \leq i \leq N}. \quad (2.8)$$

Транспортне навантаження на вибраному шляху P_j визначається за формулою 2.9

$$TL_{(P_j)} = \text{Min}[TL(P_k)]_{1 \leq k \leq M}. \quad (2.9)$$

Підрахунок транспортного навантаження на шляху P_j виконується за формулою 2.10

$$R_{TL(P_j)} = TL(P_j) / \sum_{1 \leq k \leq M} TL(P_k) \quad (2.10)$$

Співвідношення якості зв'язку по потужності сигналу до шуму

$$QL(ni, ni + 1) = SINR(ni, ni + 1) / SE(ni), \quad (2.11)$$

$$SINR(ni, ni + 1) = SR(ni + 1) \cdot NS, \quad (2.12)$$

де $QL(ni, ni + 1)$ – якість зв'язку між двома вузлами ni та $ni + 1$
 $SINR(ni, ni + 1)$ – відношення сигналу до шумових перешкод;
 $SE(ni)$ – рівень сигналу що випромінюється вузлом;
 $SR(ni + 1)$ – рівень сигналу отриманий від вузла;
 NS – рівень шуму сигналу.

Нехай LQ l_i зв'язує якість l_i між двома вузлами. Тоді мінімальне значення якості зв'язку на шляху P_k

$$LQ(P_k) = \text{Min}[LQ(l_i)]_{1 \leq i \leq N} \quad (2.13)$$

де N – число з'єднань шляху P_k .

Якість з'єднання на шляху P_j можна визначити за формулою 2.14

$$LQ(P_j) = \text{Man}[LQ(P_k)]_{1 \leq k \leq M}. \quad (2.14)$$

Тоді рівень якості зв'язку на вибраному шляху P_j

$$R_{LQ(P_j)} = LQ(P_j) / LQ(P_k)_{1 \leq k \leq M} \quad (2.15)$$

У відповідності до аналітичної моделі сформулюємо функцію вартості шляху

$$CP(P_j) = \alpha \cdot R_{RE(P_j)} + \beta \cdot R_{MD(P_j)} + \lambda R_{TL(P_j)} + \gamma R_{LQ(P_j)}, \quad (2.16)$$

$$R_{RE(P_j)} = RE(P_j) / \sum_{1 \leq k \leq M} RE(P_k), \quad (2.17)$$

$$R_{MD(P_j)} = \text{Min}[MD(P_k)]_{1 \leq k \leq M}, \quad (2.18)$$

$$R_{TL(P_j)} = TL(P_j) / \sum_{1 \leq k \leq M} TL(P_k), \quad (2.19)$$

$$R_{LQ(P_j)} = LQ(P_j) / \sum_{1 \leq k \leq M} LQ(P_k), \quad (2.20)$$

де α , β , λ та γ : коефіцієнти зважування, залежать від того, чи необхідно зосередити увагу на вузлах з низьким енергоспоживанням, або рухливістю при низькому навантаженні, чи високою якістю сигналу [2].

Оскільки, рухливість і навантаження вузлів впливають на якість зв'язку три параметри доповнюють один одного. Тому ми надаємо пріоритет енергоспоживанню, а інші параметри, такі як якість зв'язку, мобільність та навантаження трафіку матимуть однакову вагу, в такому випадку, отримаємо

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \lambda + \gamma = 1, \\ \beta + \lambda + \gamma = \alpha. \\ \beta = \lambda. \end{cases} \quad (2.21)$$

2.3 Літаючі спеціальні мережі (FANET)

2.3.1 Особливості мереж FANET

Мережа FANET (Flying Ad Hoc Network) — це набір невеликих дронів. Дрони літають у небі та спілкуються один з одним через супутники або базові станції, утворюючи спеціальну мережу. Це робить їх дуже привабливими технологіями для багатьох цивільних і військових застосувань. Завдяки

обширним дослідженням мобільних спеціальних мереж (Flying Ad Hoc Network) і автомобільних спеціальних мереж VANET (Vehicular ad-hoc networks) в останні роки, нова дослідницька проблема літакових спеціальних мереж привернула велику увагу дослідників. Ці мережі розроблені для використання повітряних дронів для побудови самоорганізованих мереж, а не типових схем зв'язку літак-земля. Однією з найважливіших проблем при розробці системи з кількома БПЛА для Flying Ad Hoc Network є мобільність, необхідна для співпраці та взаємодії між БПЛА. Для вирішення цієї проблеми були представлені різні моделі мобільності Flying Ad Hoc Network. Моделі руху визначають зміни в траєкторіях і швидкостях дронів і представляють їх положення [3].

Flying Ad Hoc Network є окремим випадком мережі Mobile Ad Hoc Network. У Flying Ad Hoc Network топологія мережі може змінюватися частіше, ніж у MANET або спеціальній транспортній мережі (Vehicular ad-hoc networks). Одним із найважливіших питань проектування багатьох систем безпілотних літальних апаратів є зв'язок, оскільки системи для безпілотних літальних апаратів літають автономно без залучення людини з дистанційним керуванням (тобто оператора). Flying Ad Hoc Network представляє новий тип мережевої архітектури, яка має специфічні проблеми на додаток до тих, які вже присутні в Mobile Ad Hoc Network або Vehicular ad-hoc networks [3]. У Flying Ad Hoc Network кожен дрон можна підключити через супутник або наземну станцію, створюючи приватну мережу між усіма дронами. Самоорганізована мережа серед БПЛА є надійним комунікаційним центром для систем з кількома БПЛА. Завдяки схемі зв'язку з кількома стрибками архітектура Flying Ad Hoc Network гарантує, що всі безпілотники завжди підключені один до одного та до базової станції чи супутника, не вимагаючи жодної інфраструктури, навіть якщо дрон не може напряму спілкуватися з базовою станцією чи супутником. Таким чином, він може не тільки миттєво передавати зібрані дані в центр управління, але й підтримувати міжміський

зв'язок БПЛА, що має велике значення для ефективного зв'язку між БПЛА [3].

У порівнянні з іншими спеціальними мережами, Flying Ad Hoc Network відрізняється високою мобільністю. Однак через таку мобільність БПЛА топологія вузлів Flying Ad Hoc Network часто змінюється, і постійне підключення стає важливим обмеженням для планування місій із кількома Flying Ad Hoc Network на основі FANET. Відстань між вузлами БПЛА відносно велика, тому для розширення доступного радіусу кожен вузол польоту потребує антени з високим коефіцієнтом посилення [3]. Передача на великі відстані також допомагає зменшити кількість стрибків і підвищити ефективність. Більшість дронів виконують операції в режимі реального часу, як правило, передають у реальному часі (відео та звук або кидають гранати в окопи росіян), що вимагає високої швидкості передачі даних. Це призводить до більш високих вимог до пропускну здатності порівняно з Mobile Ad Hoc Network або VANET [3].

Flying Ad Hoc Network представляють як Mobile Ad Hoc Network і Vehicular ad-hoc networks між ними є багато відмінностей:

- ступінь мобільності вузлів Mobile Ad Hoc Network значно вищий, ніж у вузлів Mobile Ad Hoc Network або Vehicular ad-hoc networks [3]. Як правило, типові Mobile Ad Hoc Network – це мобільні вузли, такі як смартфони та ноутбуки. Вузли Vehicular ad-hoc networks — це транспортні засоби, наприклад велосипеди на автомобілях, а вузли Flying Ad Hoc Network літають у небі;

- через високу мобільність вузлів топологія Flying Ad Hoc Network змінюється частіше, ніж топологія мережі типової мережі Mobile Ad Hoc Network або навіть мережі Vehicular ad-hoc networks;

- відстань між вузлами в Flying Ad Hoc Network набагато більша, ніж у MANET і VANET. Для встановлення зв'язку між дронами дальність зв'язку також має бути більшою.

Отже, мій вибір зупиняється на мережі Flying Ad Hoc Network.

2.4. Мобільні спеціальні мережі Flying Ad Hoc Network (FANET)

Мережі Flying Ad Hoc Network дуже динамічні, що призводить до раптових змін у топології та робить завдання маршрутизації між BPLA критично важливим. З огляду на зв'язок між вузлами, протоколи маршрутизації відіграють найважливішу роль у наскрізній передачі даних. Однак головне завдання розробки протоколів маршрутизації, застосовних до всіх сценаріїв і умов, все ще досліджується. Під час початкових досліджень і експериментів Flying Ad Hoc Network досліджувалися найкращі існуючі протоколи маршрутизації для Mobile Ad Hoc Network і Vehicular ad-hoc networks. Однак більшість протоколів маршрутизації Mobile Ad Hoc Network і Vehicular ad-hoc networks не можуть бути безпосередньо застосовані до Flying Ad Hoc Network через специфічні характеристики літаючих апаратів, а саме: швидкі зміни якості зв'язку та швидкі зміни розташування в 3D-просторі. Для адаптації до БПЛА існуючі протоколи були змінені та запропоновані нові. Ці протоколи маршрутизації поділяються на шість широких категорій:

- протоколи статичного маршрутизації
- протоколи проактивної маршрутизації;
- протоколи реактивної маршрутизації;
- гібридні протоколи маршрутизації;
- протоколи маршрутизації на основі географії /геопозиції;
- протоколи ієрархічного маршрутизації [28].

2.4.1. Статичні протоколи маршрутизації

У цьому протоколі маршрутизації кожен літаючий безпілотний апарат має таблицю маршрутизації, яка не оновлюється під час мережевого трафіку. Статичні протоколи маршрутизації використовуються, коли топологія мережі не змінюється і можливості вибору маршрутів обмежені. Тут кожен дрон передає інформацію іншим дронам або наземним станціям і зберігає лише їхню інформацію. Тому кількість зв'язків скорочується. Однак якщо оновлення

таблиці маршрутизації не вдається, потрібно дочекатися завершення завдання. Завдяки такому протоколу він не є відмовостійким [29].

Протокол завантаження та передачі даних (ПЗТЦ) передбачає, що БПЛА отримує та зберігає дані від вихідного наземного вузла та передає їх під час польоту до наземного вузла (рис. 2.2). Хоча сценарій з одним джерелом і одним цільовим одержувачем спочатку вивчався в ПЗТЦ, за необхідності можна реалізувати кілька джерел і одержувачів. Цей метод маршрутизації можна використовувати для передачі великих обсягів даних і для стійких до затримок мереж з мінімальною кількістю так званих стрибків. Основними завданнями маршрутизації ПЗТЦ є найвища пропускна здатність і вища безпека. Однак основним недоліком цього протоколу є те, що затримки передачі стають значними, коли відстань між дронами збільшується. Щоб зменшити затримку передачі, можна використовувати кілька дронів на одному шляху, де відстань між дронами має бути мінімальною, а швидкість, з якою дрони можуть рухатися, може бути збільшена. Крім того, мережу ПЗТЦ можна розділити на менші так звані «підмережі».

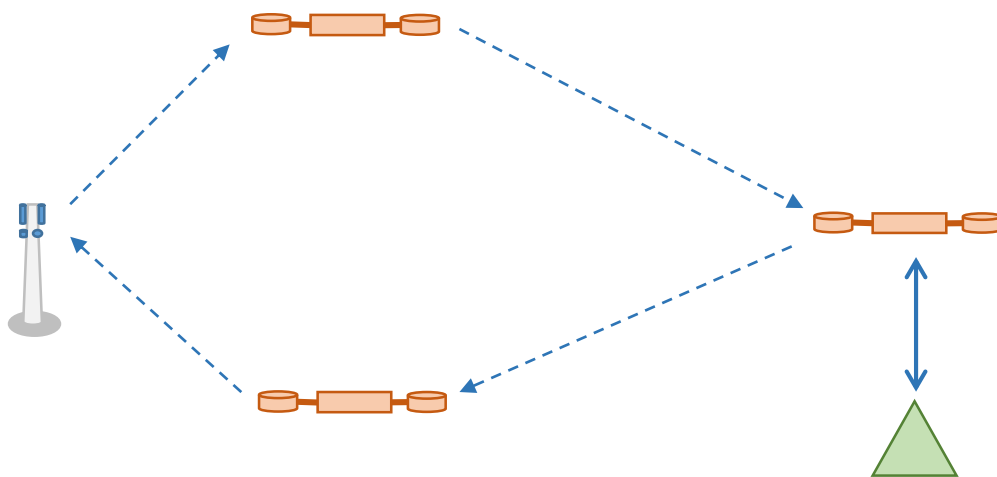


Рис.. 2.2. Схематичне зображення передачі даних у ПЗТД

Цей протокол корисний при використанні в мережах, стійких до затримок, де не потрібна передача інформації в реальному часі. Ну, наприклад, збирати дані за графіком. Багаторівневий ієрархічний протокол маршрутизації

(РВРІМ) призначений для вирішення проблем масштабованості мережі. Мережу можна розділити на кілька кластерів, які розподілені у просторі, як показано на малюнку 2.3 Кожен кластер має голову кластера, голова кластера очолює весь кластер. Крім того, вона також має зв'язки з зовнішньою частиною кластера. Кожному кластеру в мережі можна поставити різні завдання. Усі безпілотні літальні апарати в зграї знаходяться в радіусі прямого зв'язку з головою зою. Головки кластера прямо чи опосередковано підключені до БПЛА верхнього рівня, супутника або ВССМ. РВРІМ є більш ефективним, якщо дрони розгорнуті в різних роях із великими робочими зонами та в мережі присутні кілька дронів. Але найважливішим питанням РВІМ є інформація про кластер.

Висока мобільність безпілотника заохочує часті запити інформації про кластери, отже, рішення кластера прогнозування мобільності вирішує цю проблему за допомогою алгоритму прогнозування структури Trie [7] і словника ММ для прогнозування інформації про топологію мережі для тайм-аутів підключення. У цій моделі в якості головки кластера вибирається АРЛА з найбільшим навантаженням на сусідній кластер. Критерії вибору головок кластерів можуть підвищити їх стабільність. Алгоритм кластеризації для мереж літаючих безпілотних об'єктів представлено в [8]. Спочатку він демонструє кластери на землі, а потім постійно оновлює та підтримує їх у процесі роботи. Наземна кластеризація визначає план кластеризації, а потім вибирає лідерів кластерів на основі географічної інформації. Одразу після розгортання БПЛА оновить структуру кластера калібрування відповідно до операції. Ця модель маршрутизації може значно підвищити стабільність і гнучкість динамічних мереж.

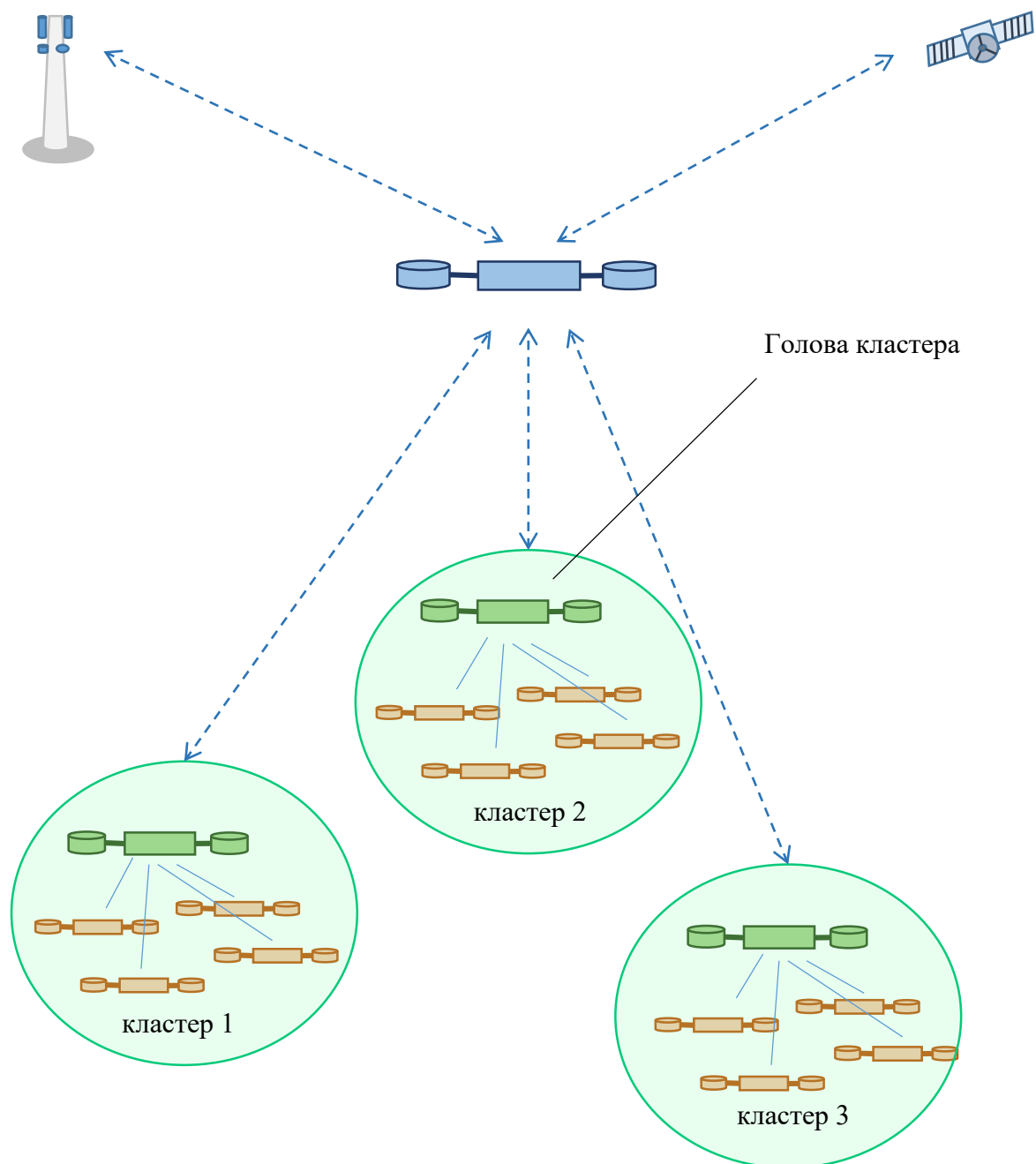


Рис.. 2.3. Схематичне зображення передачі даних у протоколі багаторівневої ієрархічної маршрутизації

Flying Ad Hoc Network може використовувати централізований протокол маршрутизації збору даних (ПЦЗД), де дані запитуються та збираються за посиланням на характеристики даних, а не на ідентифікатори відправника чи одержувача. Саме через бездротовий характер моделі зв'язку дронів я віддаю перевагу багатоадресній передачі, а не одноадресні.

2.4.2. Проактивні протоколи маршрутизації

У протоколах проактивної маршрутизації кожен вузол періодично підтримує одну або більше таблиць, що представляють повну топологію мережі. Завдяки своїй проактивності цей протокол маршрутизації має перевагу в тому, що маршрути доступні негайно, коли це необхідно. Але, на жаль, цей маршрутизатор несе додаткові витрати на підтримку актуальної інформації, що впливає на пропускну здатність мережі, надсилаючи контрольні повідомлення без потреби, навіть якщо трафік даних відсутній. Саме з цієї причини протоколи активної маршрутизації не є найкращим рішенням для високодинамічних мобільних і багатонумерних мереж БПЛА. Ці протоколи повільно реагують на них під час збою з'єднання [9].

Протокол Destination Sequential Distance Vector (ППВВ) базується на алгоритмі Беллмана-Форда з деякими необхідними змінами, щоб зробити його більш придатним для мереж Flying Ad Hoc Network. У ППВВ кожен дрон повинен розрізняти всю інформацію про інші дрони, підключені до мережі [10]. Таблиці маршрутизації регулярно оновлюються по всій мережі порядковими номерами, щоб уникнути циклічної маршрутизації [11]. Найновіший пройдений маршрут із найвищим порядковим номером має пріоритет над маршрутом із найменшим порядковим номером. Основною перевагою ППВВ є простота використання та використання серійних номерів, що передбачає безперервну передачу даних [12].

Основним недоліком цього алгоритму маршрутизації є періодичне оновлення поточної таблиці маршрутизації, що створює велике навантаження на мережу. На мою думку, цей протокол не підходить для високодинамічних мереж із частими змінами топології. Крім того, він підтримує одношарову маршрутизацію і не підтримує багаторівневу маршрутизацію [9]. Протокол оптимізації лінії зв'язку (ПОСЛЗ) - використовує таблиці, які завжди зберігають маршрути та оновлюються щохвилини [14]. Тому, коли потрібно прокласти маршрут, протокол швидко визначає маршрути на всі можливі

напрямки без затримки [15]. Для встановлення зв'язку між дронами в мережі, на яких запущені екземпляри протоколу, ПОЛЗ використовує унікальну комбінацію кількох повідомлень. ПОЛЗ - пакети даних можуть передавати три різні типи повідомлень, кожне з яких має певне призначення:

- повідомлення «HE» періодично передається для пошуку сусідів та аналізу зв'язків, сигналу багатоточкового реле;
- повідомлення керування топологією, які надають відомості про стан підключення до мережі, і повідомлення багатоінтерфейсної реклами (MRR), які виконують кілька рекламних інтерфейсів на вузлі [15].

Багатоточкова релейна сигналізація використовується для зменшення трафіку маршрутизації, створеного протоколом. MPR — це вибраний набір вузлів, які пересилають повідомлення під час «повені» (мається на увазі перевантаження мережі, коли велика кількість вузлів обмінюється повідомленнями) [9]. Лише вузли, обрані членами MPR, можуть пересилати маршрути та контролювати трафік. При використанні цієї методики обсяг трафіку, що генерується під час процесу «затоплення», значно зменшується, що робить цю техніку свого роду вибірковим «затопленням» [15].

Використання механізму MPR у ПОЛЗ може зменшити накладні витрати на повідомлення та підвищити ефективність затримки, оскільки MPR БПЛА може пересилати повідомлення лише під час «флуду». Дрон-відправник вказує на налаштоване MPR безпілота, щоб він міг охопити два сусідніх «стрибки». Дрон, який вибирає інший дрон як член MPR дрона, називається селектором MPR вузла. на рис. 2.4 показано MPR, обраний вихідним БПЛА. Однак найважливішим параметром конструкції для ПОЛЗ є кількість MPR, яка може значно вплинути на затримку. Імовірно, якщо кількість MPR зменшується, накладні витрати також зменшуються. Тому пропонується новий метод зменшення кількості членів MPR. На рис.2.5 показана схема протоколу ПОЛЗ. Для кожного надісланого пакету передавач дрона обчислює відстань до приймача дрона [9]. Якщо розрахована відстань перевищує

максимальну відстань, яку може досягти спрямована антена ($D_{max}/2$), або всенаправлена антена не може досягти пункту призначення, дрон застосує алгоритм ДОЛЗ, інакше, як зазвичай, використовуйте ПОЛЗ [16].

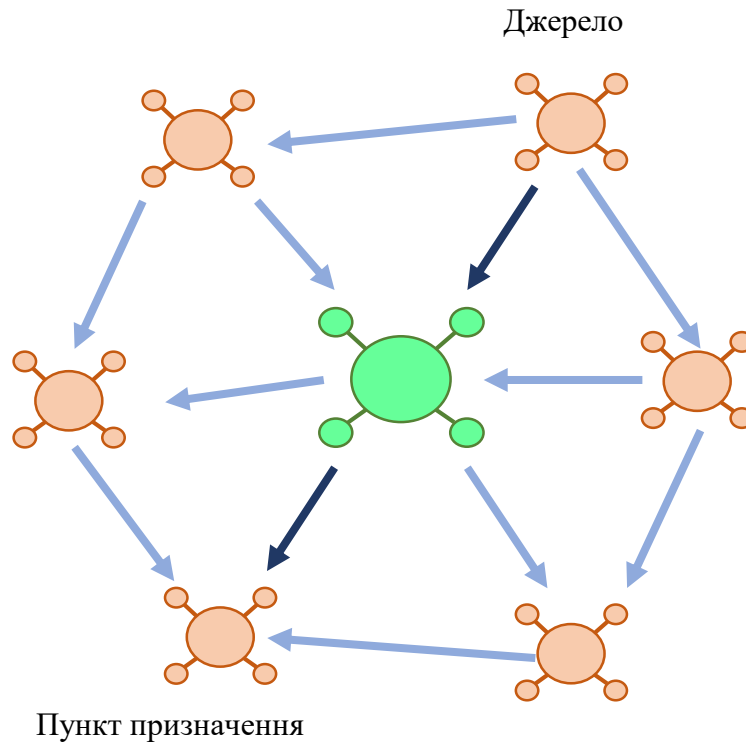


Рис.2.4. Схематичне зображення механізму багатоточкового реле (MPR)

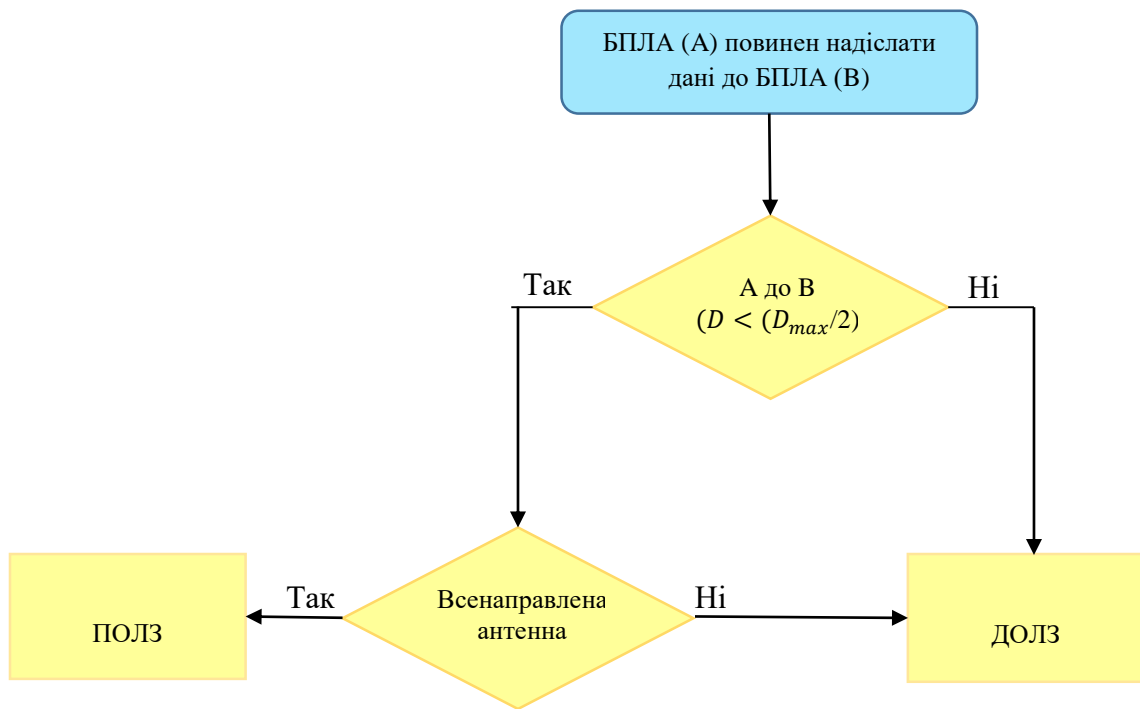


Рис.2.5. Блок схема протоколу ДОЛЗ

2.4.3. Реактивні протоколи маршрутизації

Протокол реактивної маршрутизації (ПРМ) також відомий як протокол маршрутизації, оскільки він працює за принципом пошуку або підтримки маршрутів на вимогу. Таблиця маршрутизації тут періодично оновлюється, коли є дані для надсилання. Якщо між двома вузлами немає зв'язку, то немає необхідності розраховувати маршрут між ними. Можна сказати, що ці протоколи маршрутизації зберігають лише ті маршрути, які зараз використовуються. Ми можемо зробити висновок, що це подолає загальну проблему ПРМ. У цій моделі маршрутизації створюються два типи повідомлень, а саме: запити маршрутизації, повідомлення-відповіді на ці запити [12].

Повідомлення із запитом маршрутизації надсилається від дрона-джерела до всіх сусідніх дронів за допомогою механізму затоплення для виявлення шляхів, і кожен дрон використовує той самий метод, поки не досягне цільового дрона. У той час як повідомлення відповіді ініціюється цільовим BPL і надходить до вихідного літаючого безпілотного апарату за допомогою режиму

одноадресної передачі. У цьому методі маршрутизації немає необхідності оновлювати всі таблиці в мережі.

Протоколи реактивної маршрутизації мають хорошу пропускну здатність, оскільки вони не оновлюються регулярно. Основним недоліком реактивних протоколів є те, що пошук маршрутів займає багато часу. У результаті під час пошуку найкращого шляху в мережі може виникнути висока затримка [12].

Протокол динамічної маршрутизації джерела (ПДМД) дозволяє мережам самостійно налаштовуватися, самоорганізовуватися та не потребувати існуючої інфраструктури. Основною причиною вибору DSR є його реактивність, яка в основному використовується в бездротових мережах з кількома переходами. У ПДМД джерело лише намагається знайти шлях до пункту призначення в сценарії, коли має дані для надсилання. ПДМД більше підходить для Flying Ad Hoc Network, ніж активні методи. У разі високої мобільності та нестабільних топологій [17]. Припустимо, що існує мережа Flying Ad Hoc Network, яка використовує ПДМД, як показано на малюнку 2.6. Коли вихідний вузол 1 надсилає пакет даних до вузла 5, ми бачимо, що заголовок пакету містить увесь маршрут. Проміжні вузли використовують вихідний маршрут, знайдений у заголовку пакета, щоб визначити, кому пакет має пересилати дані. Різні пакети можуть мати різні маршрути, вони навіть можуть мати те саме джерело та призначення [18].

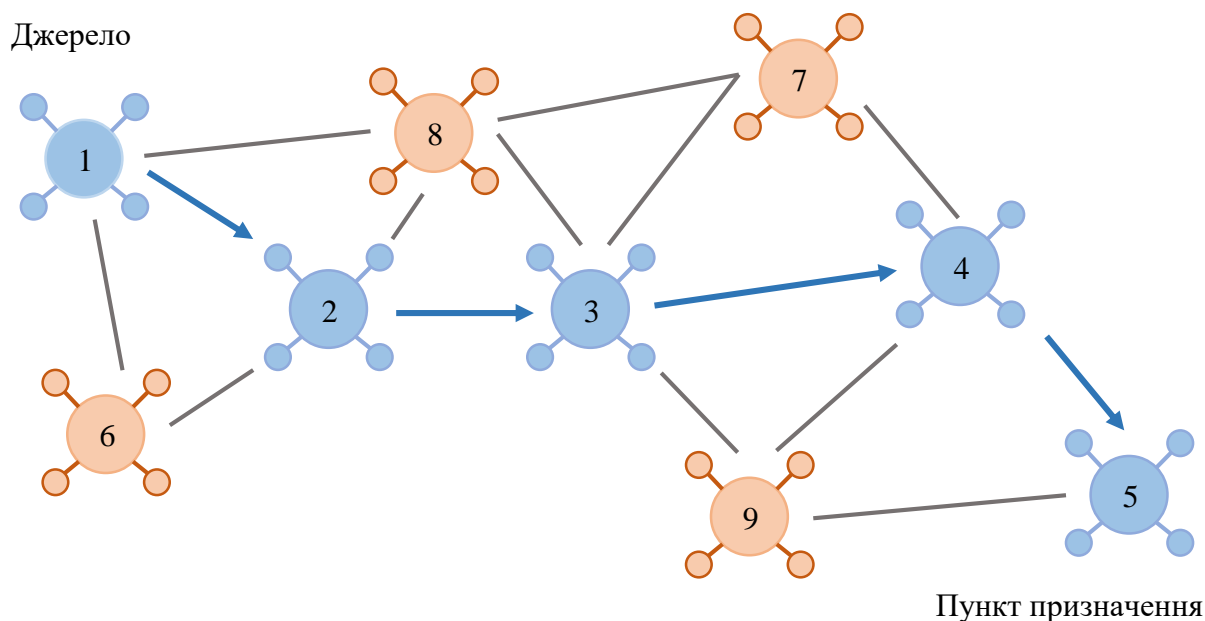


Рис.. 2.6. Схематичне зображення передачі даних у ПДМД

Через високу маневреність БПЛА оновлення таблиць маршрутизації активними методами не є оптимальним. Крім того, пошук повторюваних шляхів за допомогою реактивного підходу перед кожною передачею пакету також принесе додаткове навантаження на мережу [9]. Спеціальний векторний протокол відстані СДВЗ є вдосконаленою версією протоколів маршрутизації ППВВ і ПДМД. Він успадковує періодичні оновлення РРВВ і перехідну маршрутизацію ПДМД. Завдяки своїй реактивній поведінці СДВЗ виявляє маршрути лише за потреби та не зберігає маршрути до пунктів призначення, які не активні під час зв'язку. Протокол маршрутизації СДВЗ складається з трьох частин:

- виявлення маршруту;
- передача пакетів;
- підтримання маршруту.

Кожного разу дрон-джерело хоче надіслати пакет [9]. Він спочатку ініціює операцію пошуку шляху, щоб знайти цільовий БПЛА, а потім пересилає пакети даних за вказаним шляхом, таким чином уникаючи петель на етапі передачі пакетів даних. Фаза обслуговування маршруту відбувається

для відновлення після втрати живлення в з'єднанні. Цей протокол маршрутизації використовує порядкові номери, щоб знайти найкращий поточний маршрут до місця призначення. Кожен маршрут має власний термін дії, щоб запобігти використанню застарілих маршрутів. У цьому підході проміжні БПЛА також оновлюють свої маршрутні таблиці [9].

Основною проблемою при використанні протоколу СДВЗ є перевантаження мережі через високу динаміку Flying Ad Hoc Network.

Детермінований протокол маршрутизації попиту (DRP) також можна використовувати для Flying Ad Hoc Network. Цей алгоритм маршрутизації в основному є детермінованою версією спеціального протоколу вектора відстані відповідно до вимог [19]. СДВЗ обслуговує свої керуючі пакети в режимі довільного доступу, тобто детермінований протокол маршрутизації на вимогу використовує виділені часові інтервали, у яких лише один безпілотний літаючий апарат може надсилати пакети. Цей метод маршрутизації не тільки підвищує ефективність пропускну здатності, але також дозволяє уникнути колізій пакетів і збільшує відсоток швидкості доставки пакетів [9].

2.4.4. Гібридні протоколи маршрутизації

Гібридний протокол маршрутизації (ГПМ) — це комбінація активних і пасивних протоколів маршрутизації, які поєднують найкращі функції та компенсують недоліки один одного. Однак реактивні протоколи маршрутизації зазвичай вимагають додаткового часу для виявлення маршрутів, тоді як проактивні протоколи маршрутизації мають об'ємні контрольні повідомлення. Усунути ці недоліки можна за допомогою ПГМ. Гібридний протокол підходить для великих мереж і базується на концепції зони, де внутрішньозональна маршрутизація є проактивною, а міжзональна маршрутизація реалізується з використанням підходу реактивної маршрутизації [9].

Area Routing Protocol (ARP) призначений для мереж з великими

відстанями та різними моделями мобільності. При такому підході кожен дрон має особисту зону, яка може перекриватися з зонами сусідніх дронів. Розмір зони визначається радіусом довжини R (кількість систем ППО до периметра зони). Кількість дронів у зоні можна регулювати, регулюючи потужність випромінювання дронів. Маршрутизація всередині зони називається маршрутизацією всередині зони, і вона є проактивною. Якщо вихідний і цільовий безпілотики доступні в одній зоні, вихідний дрон може негайно розпочати передачу даних. Міжзональна маршрутизація відповідає за пересилання пакетів через межі області та використовує реактивний підхід для підтримки та пошуку найкращого маршруту. Затримка, викликана пошуком маршруту, мінімізується за допомогою граничних трансляцій. Відповідні повідомлення генеруються лише прикордонними дронами в зоні [20]

Наприклад, розглянемо випадок, коли вихідний вузол номер 4 повинен передати дані вузлу номер 12 на малюнку 2.7. Вихідний вузол 4 видає запит на маршрутизацію. Запит обмежений зовнішніми вузлами (1,2,3,6,7,8). Ці вузли шукали в таблиці маршрутизації кінцевий вузол, але, на жаль, їх не було знайдено. Отже, процес пошуку кордону продовжується (у вузлах 1, 2, 3, 6, 7, 8). Вузол номер 7 найчастіше надсилає запити своїм віддаленим вузлам (5,6,8,9). Запити не пересилаються назад до вузлів 8 і 6 через механізм керування запитами. Далі запит на маршрутизацію отримує вузол 9, вузол одержувача якого знаходиться в регіоні номер 12. Відповідь, отримана від 12, надсилається назад до джерела номер 4 [21].

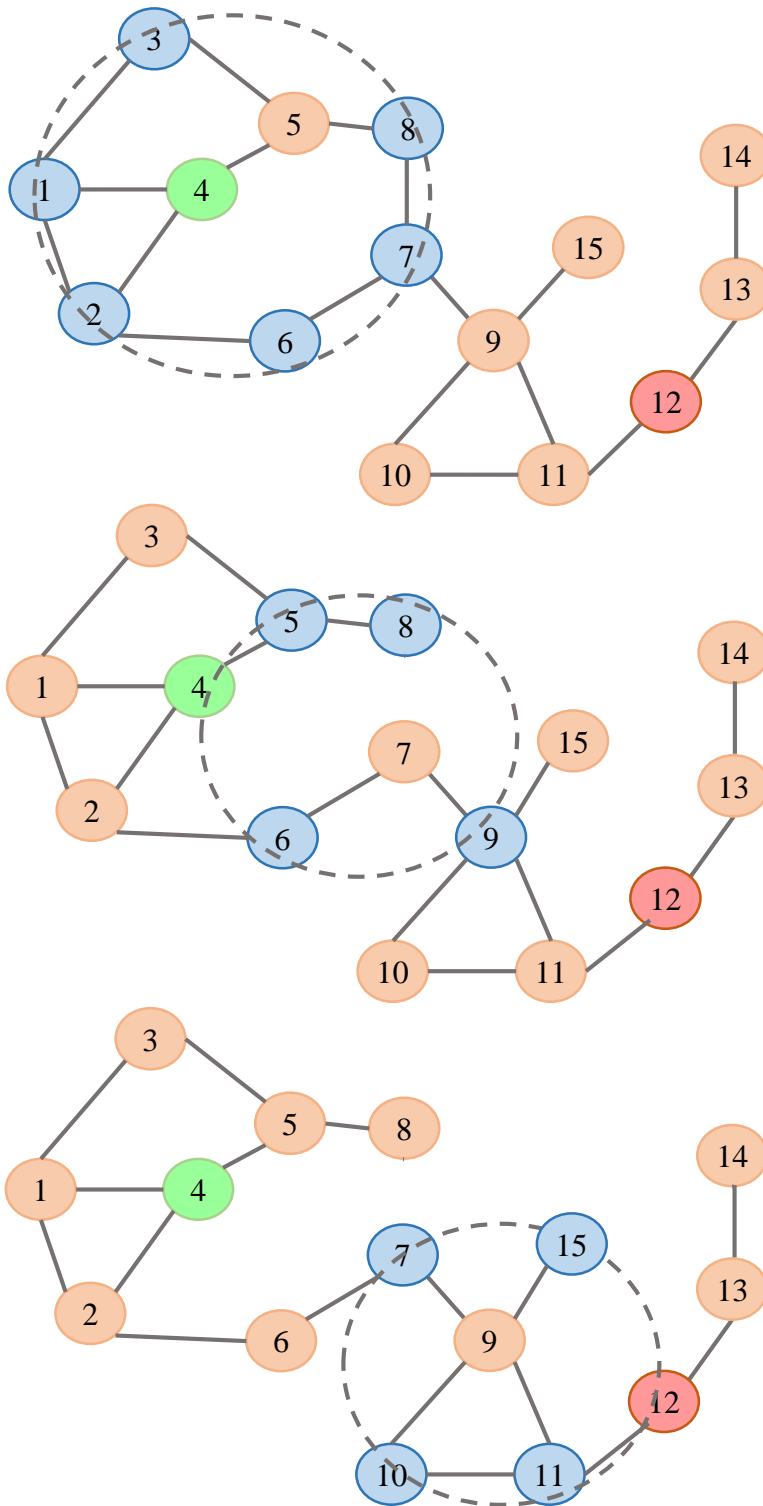


Рис. 2.7. Схематичне зображення передачі даних з використанням ПМЗ

Алгоритм упорядкованої маршрутизації за часом (ТВАМ) — це високоадаптивний протокол маршрутизації на вимогу. Цей алгоритм підходить для мереж з кількома переходами. У цьому методі маршрутизації

кожен безпілоно літаючий апарат лише оновлює свою маршрутну інформацію відносно сусідніх дронів. Особливістю протоколу є обмеження розподілу керуючих повідомлень у середовищах з високою мобільністю, щоб мінімізувати швидку реакцію на зміни топології [22]. Недійсні маршрути видаляються та шукаються нові маршрути за один прохід розподіленого алгоритму. ТВАМ використовує реактивний протокол маршрутизації, але в деяких випадках він все ще використовує проактивний підхід. Він створює та підтримує спрямований ациклічний граф (САГ) від джерела до цільових дронів (Додаток В). Є кілька маршрутів між цими безпілотниками в САГ. Цей протокол вважається більш придатним для обчислення нових маршрутів, коли зв'язок розривається, і для покращення адаптивності [23].

ТВАМ не базується на алгоритмі найкоротшого шляху та зазвичай використовує довші маршрути, щоб мінімізувати витрати мережі. Кожен дрон має значення параметра, яке в САГ називається «висотою», і значення висоти двох сусідніх дронів не можуть бути однаковими. Дані передаються від вищих дронів до нижчих. Оскільки дані не надходять до висотного дрона, у маршрутизації немає петель. Під час процесу виявлення шляху цей параметр висоти повертається до дрона, таким чином усі проміжні дрони зберігають власну таблицю шляху відповідно до вхідної інформації про шлях і висоту.

2.4.5. Протоколи маршрутизації на основі географії/геопозиції

Знання географічної інформації про положення БПЛА враховується в протоколі на основі маршрутизації для підтримки ефективної маршрутизації. Цей тип протоколу припускає, що дрон-джерело знає фізичне місцезнаходження дрона, що спілкується, і надсилає повідомлення на дрон без маршрутизації. Як правило, кожен БПЛА визначає свою власну позицію за допомогою системи GRS або будь-якого іншого типу локалізації [24]. Алгоритм заснований на наступній ідеї:

- розташування об'єкта часто використовується відправником посилки

для визначення фізичного розташування одержувача;

– Режим пересилання використовується для пересилання пакета даних на вказаний дрон.

Прикордонна маршрутизація з обмеженнями протоколу (ПОПМ) є протоколом на основі розташування, який має кращу продуктивність порівняно з активними та пасивними алгоритмами маршрутизації [25].

Пакети ПОПМ позначені джерелом і адресатом. Наслідком цього призначення є те, що вузли пересилання можуть робити локально оптимальний «жадібний» вибір при виборі наступного «стрибка» для пакета. Тобто, якщо вузол знає розташування своїх радіосусідів, локально оптимальним вибором наступного стрибка є сусід, який є географічно найближчим до місця призначення пакету. Пересилання в цьому режимі супроводжується географічно близькими «стрибками» до досягнення пункту призначення [24].

На малюнку 2.8 показано приклад найближчого вибору. Тут x отримує пакет, призначений для радіодіапазону D . Радіосмуги для x і D позначені пунктирними колами. x пересилає пакет до y , тому що відстань між y і D менша, ніж відстань між D і будь-яким іншим сусідом x . Процес обмеженої граничної маршрутизації повторюється, поки пакет не досягне D [26]. Цей протокол використовується в щільно розгорнутих мережах. Однак у цьому сценарії розгортання надійність мережі може викликати серйозне занепокоєння.

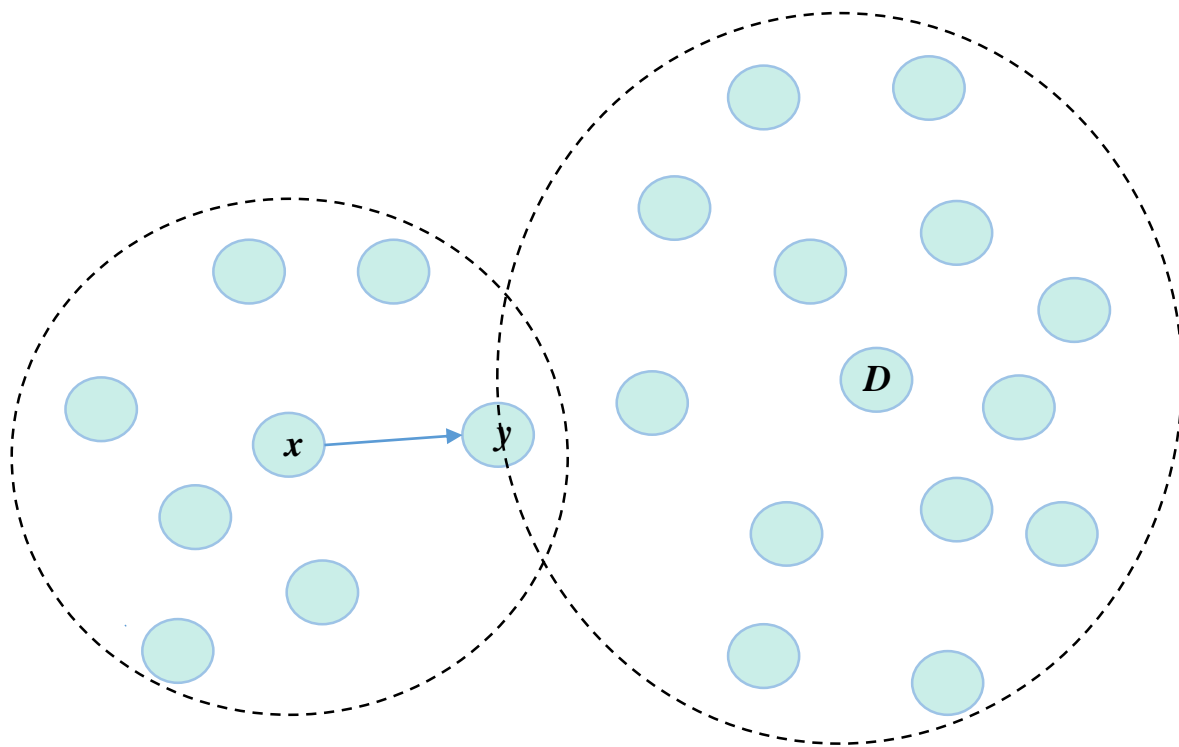


Рис. 2.8. Схематичне зображення маршрутизації у ПОПМ

Протокол геолокації, орієнтований на мобільність, не тільки враховує інформацію про місцезнаходження БПЛА, але й обчислює рух БПЛА відповідно до моделі мобільності Гауса-Маркова. Отримані дані використовуються для наступного переривання. Цей механізм маршрутизації був досліджений для ефективного забезпечення пересилання даних з високою швидкістю доставки пакетів і низькою затримкою [24].

2.4.6. Ієрархічні протоколи маршрутизації

У протоколі ієрархічної маршрутизації можливість вибору між активною та пасивною маршрутизацією залежить від ієрархічного рівня мережі, на якій знаходиться сам літаючий апарат. Нечаста маршрутизація таких додатків спочатку визначається деякими проактивно запланованими маршрутами, а потім ініціює запити вузлів до верхнього рівня за допомогою реактивного протоколу. Величезним недоліком цього протоколу є складність програми та програмування, а також схеми адресації, що відповідає за запити

трафіку. Алгоритм кластеризації для прогнозування мобільності (АКПМ) реалізовано за допомогою словника алгоритму прогнозування структури "Trie" [7] і часу життя лінії зв'язку для вирішення проблем, пов'язаних з високою мобільністю дронів. Основна перевага цього алгоритму полягає в тому, що він зменшує нестабільність кластеризації та покращує продуктивність мережі.

2.5. Порівняльна характеристика протоколів FANET

У таблиці 2.1. Показано порівняння функцій протоколів Flying Ad Hoc Network. Статичні протоколи, засновані на таблицях маршрутизації, слід використовувати за трьох умов завдання:

- район польоту визначена яка не містить непередбачуваних перешкод;
- завдання невідповідальне, тому затримка буде несерйозною;
- топологія мережі заздалегідь визначена і не змінюється протягом місії.

Особливістю цього протоколу є відсутність службової сигналізації, оскільки маршрутизація заздалегідь задана в таблиці. Це означає, що вузли не будуть ініціювати зв'язок із сусідами для уточнення розташування чи іншої інформації. У свою чергу, відсутність службових повідомлень позитивно впливає на енергоспоживання вузлів і всієї мережі. Оскільки весь план місії завантажується перед зльотом, для цього потрібно багато пам'яті.

Для статичного протоколу можна уявити сценарій, де розташування наземних вузлів є відносно фіксованим, а лінія передачі використовується для збору даних. Також, як приклад, збирається інформація про стан середовища з урахуванням статичної мобільності вузлів (тобто вони не рухаються для пошуку необхідної інформації, а лише збирають її на вузлі, зазначеному в маршрутизації стіл) [24].

Таблиця 2.1.

Порівняння характеристик протоколів Flying Ad Hoc Network

Критерій	Протоколи		
	Статичні	Проактивні	Реактивні
Основна ідея	Статична таблиця маршрутизації	Таблиці маршрутизації що оновлюються	Протокол за потребою
Складність	Низька	Середня	Середня
Маршрут	Статичний	Динамічний	Динамічний
Розмір мережі	Невелика	Середня	Велика
Об'єм пам'яті	Високий	Високий	Низький
Відмовостійкість	Відсутня	Присутня	Присутня
Використання смуги пропускання	Максимальне	Мінімальне	Мінімальне
Час конвергенції	Швидко	Повільно	Переважно швидко
Службові сигнали	Відсутні	Присутні	Присутні
Затримки зв'язку	Низька	Низька	Висока
Коефіцієнт відмов місії	Високий	Низький	Низький
Розповсюдженість	Низька	Середня	Середня
Застосування	Фіксована місія	Динамічна місія	Динамічна місія
Складність	Середня	Висока	Висока
Маршрут	Динамічний	Динамічний	Динамічний
Розмір мережі	Будь-яка	Велика	Велика
Об'єм пам'яті	Середній	Високий	Низький
Відмовостійкість	Переважноприсутня	Присутня	Присутня
Використання смуги пропускання	Середнє	Мінімальне	Максимальне
Час конвергенції	Середній	Середній	Середній
Службові сигнали	Присутні	Присутні	Присутні
Затримки зв'язку	Високі	Низькі	Високі
Коефіцієнт відмов місії	Дуже низький	Дуже низький	Дуже низький
Розповсюдженість	Висока	Низька	Висока
Застосування	Динамічна місія	Динамічна місія	Динамічна місія

ВИСНОВКИ ДО РОДІЛУ 2

Отже, вище прераховані протоколи не перевантажують вузли через відсутність службових сигналів. Вони впливають на швидкість обміну даними. Наприклад, якщо мережа буде перебувати в зоні надійних супутникових або BSSM сигналів протягом всієї місії, дані можуть бути відправлені в мережу дуже швидко, якщо місія це надає. Величезним недоліком статичних протоколів є те, що вони не є відмовостійкими. Варто також враховувати, що складні протоколи стали легшими для реалізації з часом і технологією. Через це рекомендуються відмовостійкі протоколи.

Активні протоколи більш складні, оскільки таблиці маршрутизації можна оновлювати, а один вузол може мати кілька таблиць, що, у свою чергу, впливає на споживання енергії. Протокол шукає цільовий вузол після кожної зміни топології, що призводить до більш тривалого часу конвергенції. Можливість оновлення маршрутів робить ці протоколи відмовостійкими, а крім того, можливі динамічні оновлення маршрутів.

У реактивному протоколі маршрут обчислюється за запитом, а джерело розраховує маршрут після отримання запиту. Вихідна маршрутизація стає складнішою, коли топологія змінюється, що робить протокол складнішим, ніж статична маршрутизація, але це також дозволяє прокладати динамічну маршрутизацію. Може використовуватися в мережах з великою кількістю вузлів, отже, більша відстань між вузлами - і більша затримка. Реактивні протоколи не вимагають багато пам'яті та пропускної здатності, оскільки джерело запитує маршрути лише тоді, коли вони йому потрібні. Реактивні протоколи часто можуть завершити маршрутизацію швидше, але тільки якщо топологія не змінилася.

Гібридний протокол поєднує в собі характеристики активного протоколу та пасивного протоколу. Протоколи маршрутизації на основі

географічного/географічного розташування дуже складні та потребують багато пам'яті через спосіб їх запису в кеш. Ці протоколи дозволяють організувати великі відмовостійкі мережі з низькою затримкою. Багатошарові протоколи важко досягти, особливо в міських умовах. Однак завдяки своїй структурі він не потребує багато пам'яті. Він також, як і попередній, дозволяє організовувати великі мережі, але через свою ієрархічну структуру затримка зв'язку висока. Наведені вище протоколи використовують обмежену пропускну здатність, оскільки кожен дрон підключений до верхнього дрона.

РОЗДІЛ 3

ПРИНЦИП ПОБУДОВИ, ОСОБЛИВОСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИТМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ

3.1. Протокол маршрутизації централізованого збору даних (ПЦЗД)

Моїм вибором та рекомендацією наших військових буде алгоритм маршрутизації централізованого збору даних можливий для Flying Ad Hoc Network можуть використовувати централізовані алгоритми маршрутизації збору даних, де дані запитуються та збираються на основі характеристик даних, а не ідентифікаторів відправника чи отримувача (рис. 3.1). Через бездротовий характер моделі зв'язку БПЛА багатоадресний обмін даними може бути кращим перед одноадресним.

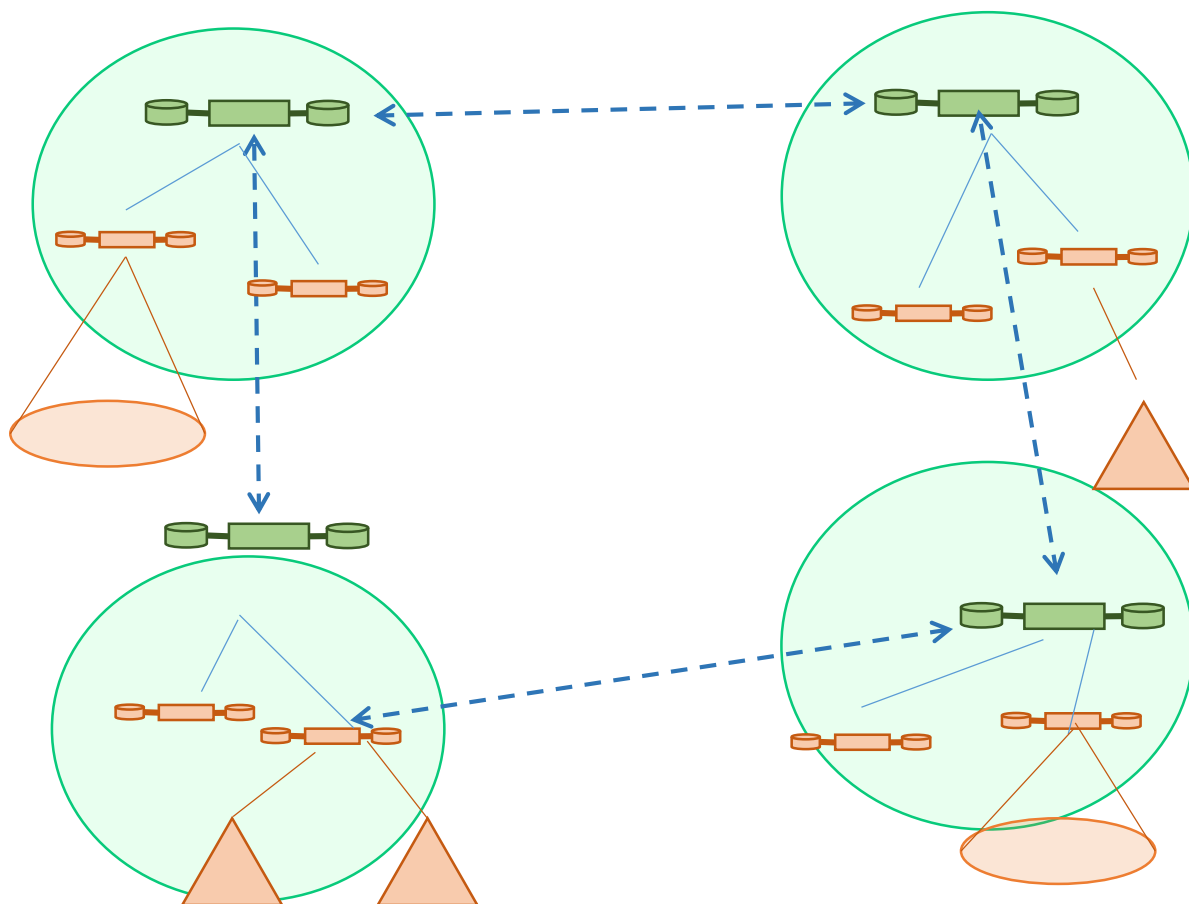


Рис. 3.1. Схематичне зображення обміну даними у протоколі

маршрутизації централізованого збору даних

Цей алгоритм маршрутизації може бути використаний, коли декілька БПЛА генерують запити на дані, а розподіл даних виконується за алгоритмом запиту. DPS можна використовувати в Flying Ad Hoc Network для забезпечення кількох типів додатків в однорідній системі безпілотники для накопичення точних даних із конкретної зони місії. Як правило, модель публікації-підписки підходить для таких архітектур. Він автоматично підключається до джерел даних (які називаються видавцями) і споживачів даних (так звані передплатники). Вихідний вузол приймає інформацію для публікації, а потім починає розповсюджувати дані. Після того, як опубліковані дані надходять на дрон у мережі, він намагається знайти повідомлення про підписку, а потім пересилає дані на дрон-приймач. Головною перевагою цього алгоритму маршрутизації є те, що він може надсилати підписникам лише зареєстрований вміст. А ще, як кажуть військові, цей алгоритм можна запрограмувати “на колінках”, тобто можна запрограмувати в польових умовах [4].

Протокол централізованої колективної маршрутизації ділиться на три виміри

- просторове розділення: безпілотники можуть спілкуватися де завгодно, не знаючи ідентичності та місцезнаходження один одного;
- пасовий поділ, зв'язок між дронами, їм не обов'язково бути онлайн одночасно, дані можуть передаватися користувачеві в поточний час або пізніше;
- поділ потоку: доставка даних може бути виконана надійно за допомогою асинхронних структур зв'язку.

Ця модель маршрутизації може бути кращою, коли кількість дронів у мережі невелика, а дрони мають заздалегідь визначений план польоту з мінімальною взаємодопомогою між кластерами.

3.2. Аналіз моделей мобільності мереж FANET

Модель руху (ММ) представляє рух вузлів і те, як їх положення, швидкості та прискорення змінюються з часом. ММ використовуються для створення реалістичних імітованих середовищ, щоб продемонструвати, як продуктивність певного протоколу значно відрізняється при використанні різних ММ. Можна порівнювати різні моделі за умови, що всі моделі використовують відомі протоколи маршрутизації. Розглянемо такі ММ:

- ММ на основі випадкових точок маршрутизації;
- ММ Гаусса-Маркова;
- ММ для напіввипадкового руху по колу;
- ММ базується на плануванні місії.

Моделі мобільності, засновані на випадкових маршрутних точках, включають час пауз між змінами напрямку та/або швидкості. У всіх моделях, заснованих на випадковому русі, вузол літаючих апаратів може вільно рухатися в будь-якому напрямку в змодельованому просторі. Можна сказати, що вузол може вільно вибирати пункт призначення, швидкість і напрямок незалежно від сусідніх вузлів. Дрон приймає рішення на основі встановлених ймовірностей. Дотепер стохастичні моделі шляхових точок використовувалися як синтетичні ММ у більшості сценаріїв моделювання. Однак це не працює для планерів, оскільки літаки не змінюють свій напрямок і швидкість одночасно, і не можуть залишатися в тій самій точці деякий час, як модель випадкової маршрутної точки. Ця ММ базується на трьох діях: «прямо», «поворот ліворуч» і «поворот праворуч» [4]. Схематична діаграма ММ на основі випадкових точок маршрутизації наведена на малюнку 3.2.

Розглянута модель ідеалізована без урахування багатьох факторів, таких як: положення суміжних вузлів, перешкоди тощо. Її можна використовувати лише як модель для порівняння інших параметрів у випадках, коли можливі перешкоди в русі вузла можна проігнорувати.

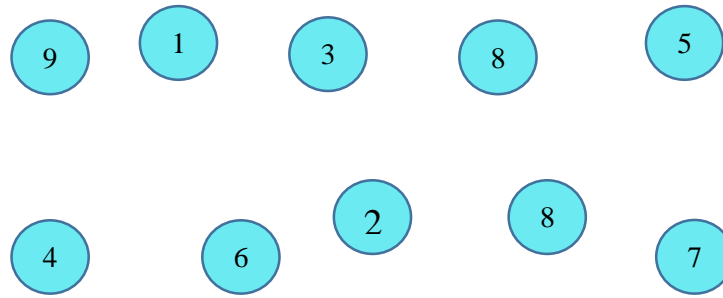


Рис. 3.2. Схематичне зображення ММ на основі точки випадкового маршруту

Модель мобільності Гаусса-Маркова використовується для моделювання поведінки в зграї БПЛА. Розмір області моделювання є змінним. Через швидкий рух положення вузла завжди вказує на його попереднє положення. Шлях дрона визначається пам'яттю моделі. У моделі руху Гаусса-Маркова кожен вузол ініціалізується швидкістю та напрямком. Рухайтесь через рівні проміжки часу, оновлюючи швидкість і напрямок кожного вузла. Значення швидкості та напрямку для n -го інтервалу часу обчислюються зі значень швидкості та напрямку для $n-1$ -го інтервалу часу та випадкової величини. Як показано на малюнку 3.3, вузли рухаються відповідно до своїх попередніх позицій.

Ця модель відрізняється від попередньої тим, що вона враховує положення вузлів і їх прискорення. Застосування моделі Гаусса-Маркова підходить для вивчення руху бджолиної сім'ї до місця призначення і на цьому шляху немає перешкод.

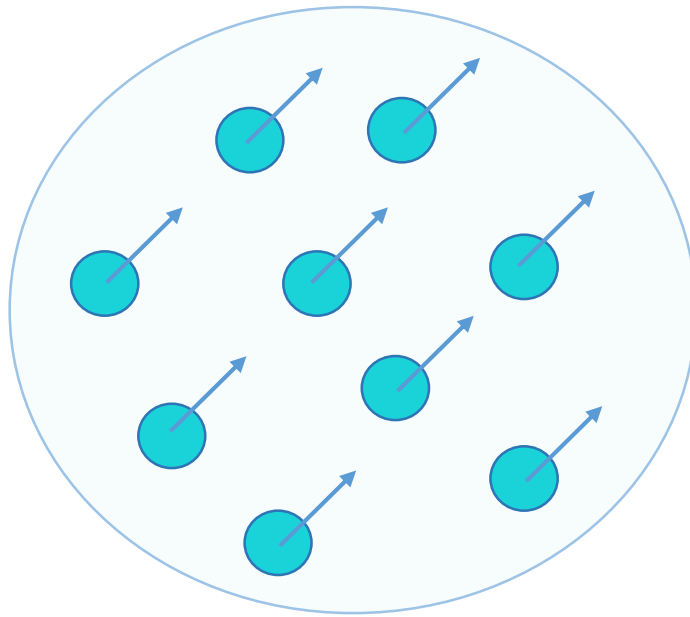


Рис. 3.3. Схематичне зображення переміщення вузлів у ММ Гауса Маркова

Модель мобільності для напіввипадкового руху по колу була розроблена для сценаріїв вигнутого руху дрона [4]. Він підходить для імітації БПЛА, що обертається в певному положенні, і збирає певну інформацію. ММ з гексагональними маршрутами замість моделей на основі випадкових шляхових точок, для непередбачуваних допоміжних вузлів, таких як дрони, чий плани польоту не визначені [5]. У цій моделі кожен літальний апарат у будь-який момент шукає місце в квадратній області та вибирає бажану ціль у цьому місці, як показано на малюнку. 3.4.

Модель напіввипадкового кругового руху слід використовувати під час моделювання сценаріїв, коли безпілотною має аналізувати певну територію, збираючи дані з датчиків або частин землі.

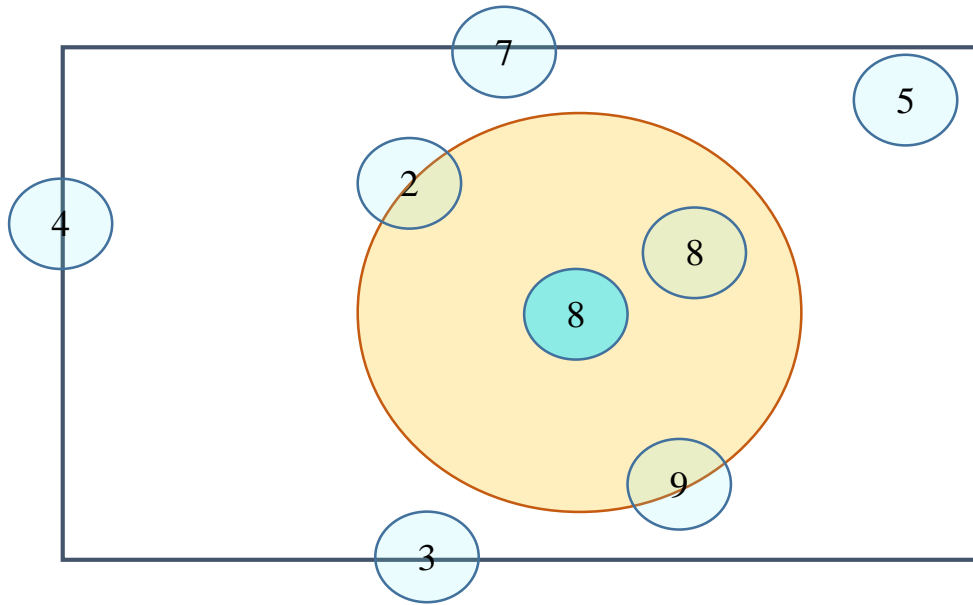


Рис. 3.4. Схематичне зображення ММ напів-випадкового кругового руху

Модель мобільності, заснована на плануванні місії. У таких моделях літальний апарат вже знає всю необхідну та достатню інформацію про траєкторію, яка зазвичай заздалегідь спланована [5], що означає, що літак завжди рухається по заданій траєкторії з потенційною інформацією про положення цілі, наприклад, літак, який прибуває в район місії (рис. 3.5).

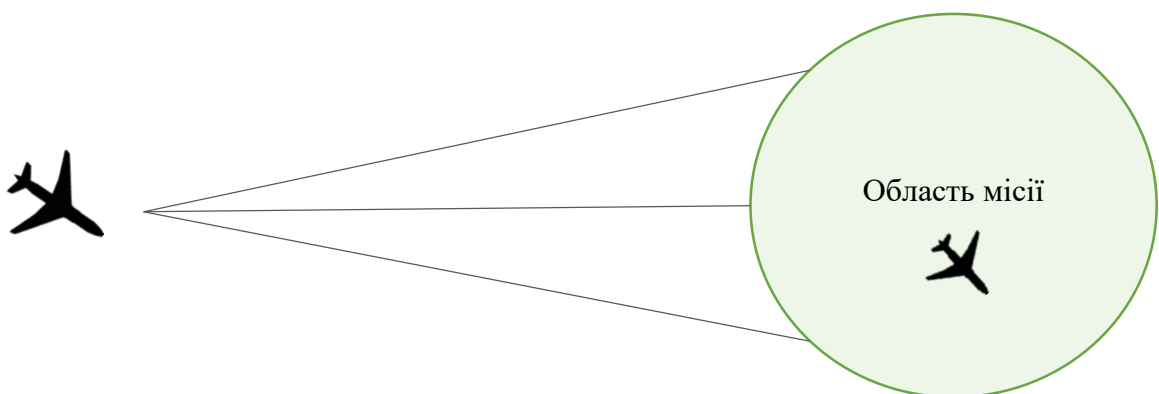


Рис. 3.5. Схематичне зображення ММ на основі плану місії

У цій моделі мобільні файли створюються та оновлюються через певні проміжки часу. ММ на основі плану місії використовується для літаків, які

повинні рухатися до пункту призначення або від нього. Для кожного літака початкова і кінцева точки вибираються випадковим чином, при цьому встановлюється швидкість і час польоту. Якщо дрон досягає пункту призначення до закінчення часу польоту, змініть напрямок на вихідну точку та продовжуйте подорож в “дві сторони” [6].

Цю модель слід використовувати в поєднанні з наведеними вище моделями під час вивчення мережевих планів польотів до районів призначення. Приклад такого поєднання моделей наведено на рис.3.5.

У першому випадку який показано на рис. 3.6 (а) вирішальною буде модель плану місії. Момент підйому вузла буде визначатися моделлю руху на основі випадкових шляхових точок. Організація натовпу буде поєднувати в собі напіввипадковий круговий рух М.М. і Гаусса-Маркова М.М. Рух групи продовжиться за тією ж моделлю Гаусса-Маркова. У наведеному прикладі передбачається, що мережа буде «шукати» необхідні параметри середовища за напіввипадковою моделлю кругового руху. Як згадувалося раніше, модель, заснована на розкладі завдань, виступатиме в якості «контролера» в цьому прикладі. [5].

У другому випадку який зображений на рис. 3.6 (б можна передбачити, що кілька дронів у мережі в якийсь момент відокремляться та отримають свої завдання. У цьому випадку модель планування місії не буде домінувати. Сітку підняли в повітря, а організація рою залишилася без змін. Наступним кроком, на відміну від попереднього прикладу, буде розподіл окремих вузлів, кожен з яких отримує власний план місії та рухається відповідно до моделі руху відповідно до плану місії.

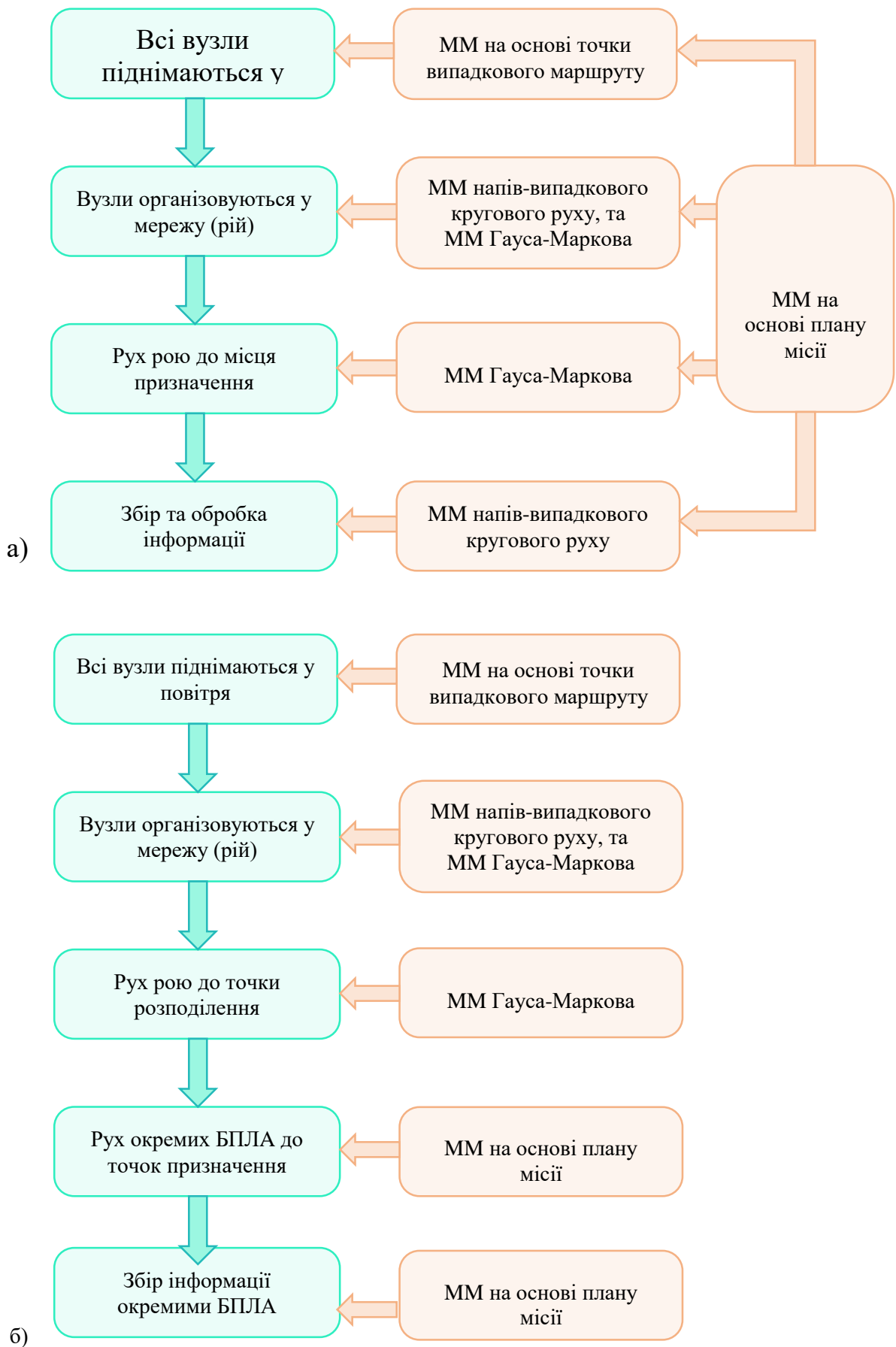


Рис. 3.6. Блок-схема прикладу використання моделей мобільності маршрутизації у мережах Flying Ad Hoc Network

3.3.. Адаптивний підхід до руху БПЛА з точки зору обходу перешкод

Розглянемо рух групи дронів. Щоб цей рух був синхронізованим, вузли повинні час від часу обмінюватися інформацією про свої позиції. Частота цього обміну впливає на автономність вузлів. Якщо запити про місцезнаходження надсилаються занадто часто, тоді [8]:

- енергоспоживання всіх вузлів зросте;
- зросте навантаження на мережу;
- зросте навантаження на радіо та канали зв'язку;
- виходячи з вище згаданих факторів, можливі збої у роботі всієї мережі;
- у мережах з великою кількістю вузлів може статися десинхронізація мережі позиціонування (рис. 3.7);
- точність позиціонування кожного вузла та всієї мережі буде покращено.

Крім того, підвищення точності локалізації в цьому випадку може бути надмірним і буде отримано за рахунок споживання енергії та обчислювальної потужності. Показники позиціонування начебто хороші, але з урахуванням можливих збоїв це не прийнятна ціна. Розсинхронізація мережі позиціонування може статися через вже згадані причини, наприклад, перевантаження мережі та радіоканалів [8].

В результаті можуть виникати затримки в передачі даних між вузлами, а враховуючи, що вузли постійно рухаються, це може призвести до десинхронізації. Тобто вузли не встигають обмінюватися даними про поточне місцезнаходження [8].

Крім перерахованих вище причин, таких як перевантаження мережі, також варто враховувати, що в момент десинхронізації вузли можуть бути далеко один від одного. Якщо припустити, що для тривалого надійного

польоту вони повинні знаходитися на відстані від l_{min} до l_{sr} , то без синхронізації вони можуть рухатися від l_{sr} до l_{max}

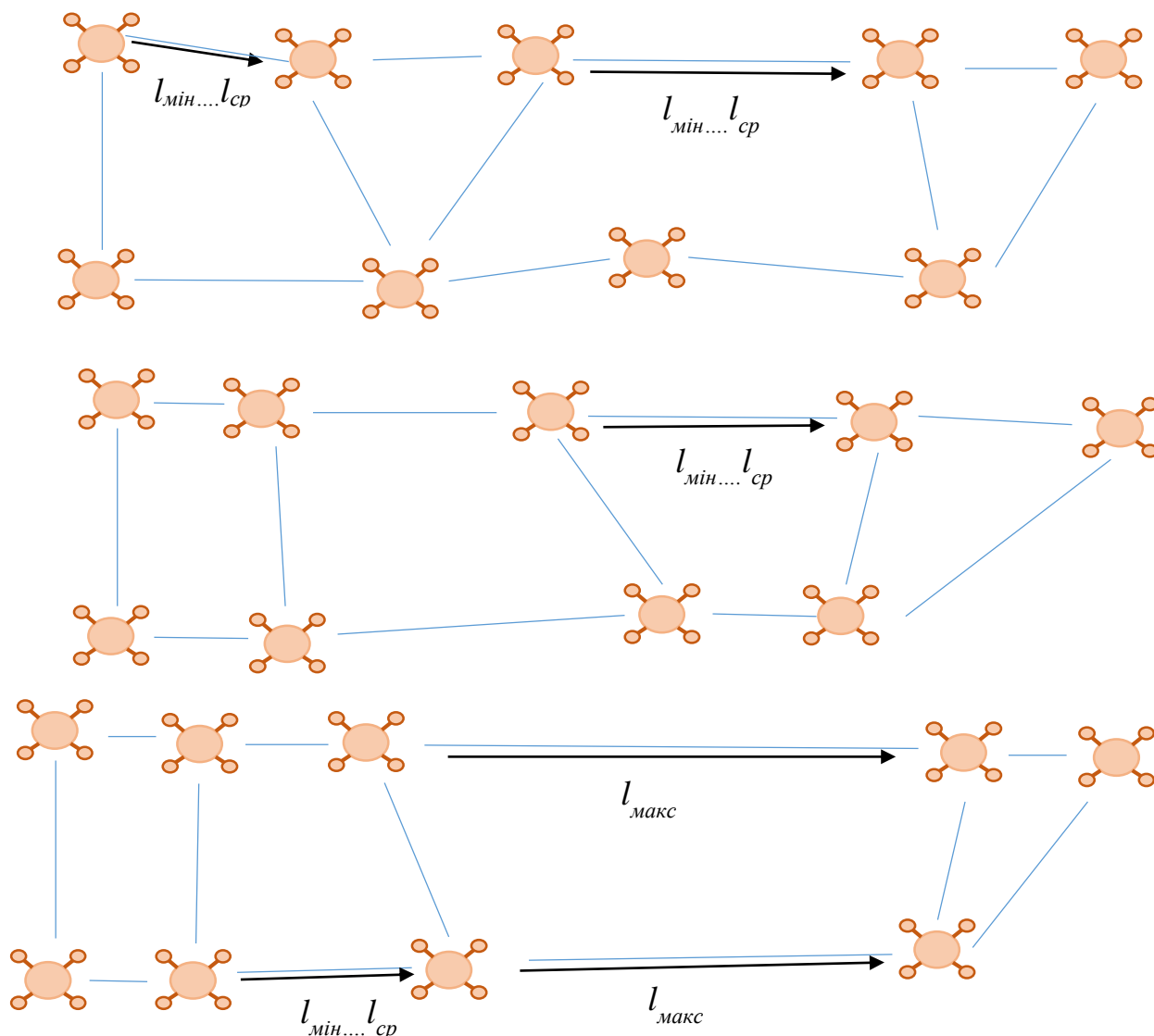


Рис. 3.7. Схематичне зображення розсинхронізації мережі по розташуванню

Відстань енергоспоживання між вузлами:

- l_{min} відстань між вузлами для надійного сигналу, при якому відношення сигнал/шум на вході радіопередавача є занадто високим при мінімальному споживанні потужності радіопередавача;

- l_{sr} – міжвузлова відстань, при якій ще зберігається резервування рівня сигналу на вході передавача, а споживана потужність знаходиться на

середньому рівні (мається на увазі конкретний радіопередавач за заявленим номінальним рівнем);

– l_{max} – максимальна відстань, на якій може підтримуватися надійний міжвузловий зв'язок, що характеризується високим енергоспоживанням радіопередавачів [9].

Адаптивний метод організації обміну даними щодо позицій вузлів відноситься до методу, при якому частота обміну даними щодо їх позицій може змінюватися. Наприклад, коли на шляху зграї дронів немає перешкод, частота «зв'язку» вузла буде значно нижчою, а коли на шляху є перешкода, частота «зв'язку» вузла буде пропорційна складності обходу перешкоди (складність відноситься до геометрії перешкод). Під складністю мається на увазі геометричні форми перешкоди показано на рис. 3.8.

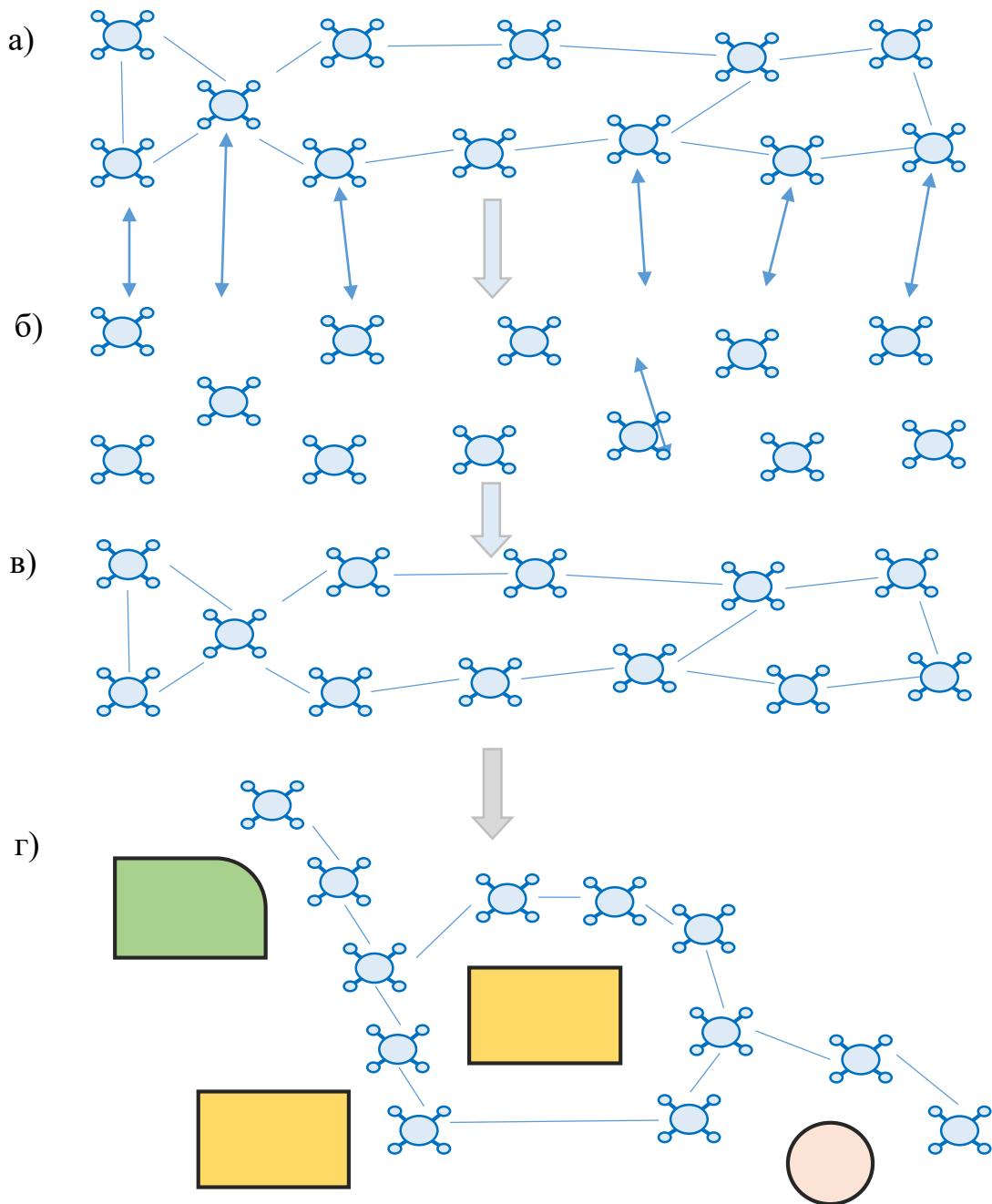
Складність перешкоди залежить від:

- кількості кутів;
- кількість незалежних елементів перешкоди;
- густота перешкоди.

Наприклад, житловий будинок прямокутної форми може бути простою перешкодою, оскільки не містить великої кількості окремих елементів і є простою геометричною фігурою. Важкою перешкодою можуть стати дерева або група будинків, розташованих близько один до одного

Основна ідея адаптивного уникнення перешкод полягає не тільки в частоті обміну даними про місцезнаходження. Якщо група дронів не знаходить перешкод на найближчому шляху, вони розраховують приблизну відстань, яку вони пройдуть по визначеній траєкторії (рис. 3.8 (a)). Після того, як дрон «погодиться», кожен вузол буде підтримувати свій рух у заданому напрямку (рис. 3.8(b)) протягом певного часу (на основі узгодженої відстані, яку необхідно подолати до наступного стану обміну даними про перешкоди попереду) (Рис. 3.8(b)), кожен вузол буде автономно виконувати корекцію таких рухів на основі показників (швидкість, висота) своїх датчиків. Такий

підхід дозволить уникнути надмірного споживання енергії на інтервалах шляху, оскільки не потрібно встановлювати частий зв'язок між вузлами [10].



- а) – початковий аналіз шляху на наявність перешкод, перешкод не виявлено;
- б) – рух БПЛА по шляху без перешкод;
- в) – повторний аналізу шляху на наявність перешкод, виявлення перешкод;
- г) – рух БПЛА як рою, з обходами перешкод.

Рис. 3.8. Схематичне зображення адаптивного підходу щодо руху БПЛА з точки зору обходу перешкод

Коли на шляху виявляється перешкода, дрони рухаються в напрямку перешкоди, і вони можуть використовувати, наприклад, поведінку роя, щоб обійти її.

3.4 Функція енергетичної обізнаності

Нехай $fep_j(t)$ буде мінімальною залишковою енергією вузла після проходження шляху j (від джерела s до пункту призначення d) за час t рахується за формулою 3.1.

$$fep_j(t) = \min_{i=1}^{n-1} (fen_{i,j}(t)), \quad (3.1)$$

де $fep_j(t)$ – функція енерговитрат вузла i , що належить до шляху j , і формально дорівнює

$$fen_{i,j}(t) = \frac{Elev_{i,j}(t)}{DR_{i,j}(t)} \cdot \omega_{i,j}, \quad (3.2)$$

де $DR_{i,j}(t)$ — інтенсивність розряду вузла i , що належить до шляху j , у момент часу t , визначена як швидкість, з якою даний вузол споживає енергію, як правило, коли цей вузол використовується як шлюз для передачі даних між іншими вузлами;

$\omega_{i,j}$ – ваговий коефіцієнт вузла i , що належить шляху j , який залежить від таких факторів: якість батареї, ємність батареї, час роботи батареї [10];

$Elev_{i,j}(t)$ — рівень енергії вузла i , що належить шляху j , у момент часу t , момент встановлення з'єднання між вузлом джерела s і вузлом призначення d

$$Elev_{i,j}(t) = \frac{E_{i,j}(t)}{E_a} \cdot \omega_{i,j}, \quad (3.3)$$

де $E_{i,j}(t)$ – енергія, що залишилася вузла i , що належить до шляху j у момент часу t ;

E_a — це середня енергія, що залишилася для m вузлів, які беруть участь у процесі виявлення багатопроменевого поширення між вихідним вузлом s і вузлом d . E_a визначається наступним чином

$$E_a = \frac{\sum_{i=1}^m E_i}{m}. \quad (3.4)$$

3.5. Висновки щодо енергоефективності в БПЛА

Енергоспоживання кожного вузла є важливим фактором, що впливає на роботу всієї мережі. Фактори, що впливають на енергоспоживання, визначаються як програмними компонентами мережі, так і апаратними засобами. Загалом підходи до енергоефективності в польотних мережах такі:

- Зведіть до мінімуму непотрібні службові повідомлення під час руху та організації мережі;
- Спосіб обміну даними, що враховує нерівномірний розряд акумуляторів на кожному вузлі;;
- використання датчиків із мінімальним споживанням енергії;
- вибір найкращих акумуляторів;
- використання альтернативних джерел живлення.

Варто врахувати, що принципово нових технологій виготовлення акумуляторів на даний час ще не придумали. З цього можемо зробити висновки, що варто більше уваги приділити саме організації обміну даними.

Наприклад, у мережі з декількома дронами, які діють як шлюзи, проблему нерівномірного розряду можна вирішити шляхом порівняння їхніх залишкових рівнів енергії. Але в момент, коли рівень перевищує певну межу, роль шлюзу переходить до сусіднього БПЛА (рис. 3.9) (за умови, що всі вузли

мережі оснащені радіомодулями однакової потужності). У цьому випадку, крім залишкової енергії, необхідно враховувати відстань між вузлами, які повинні замінювати один одного. Якщо відстань надто велика, це може спричинити сильний розряд вузла, що діє як шлюз, і в цьому випадку його краще замінити на вузол, рівень залишкової енергії якого не найвищий у мережі, але фізично ближчий до шлюз замінюється Node [10].

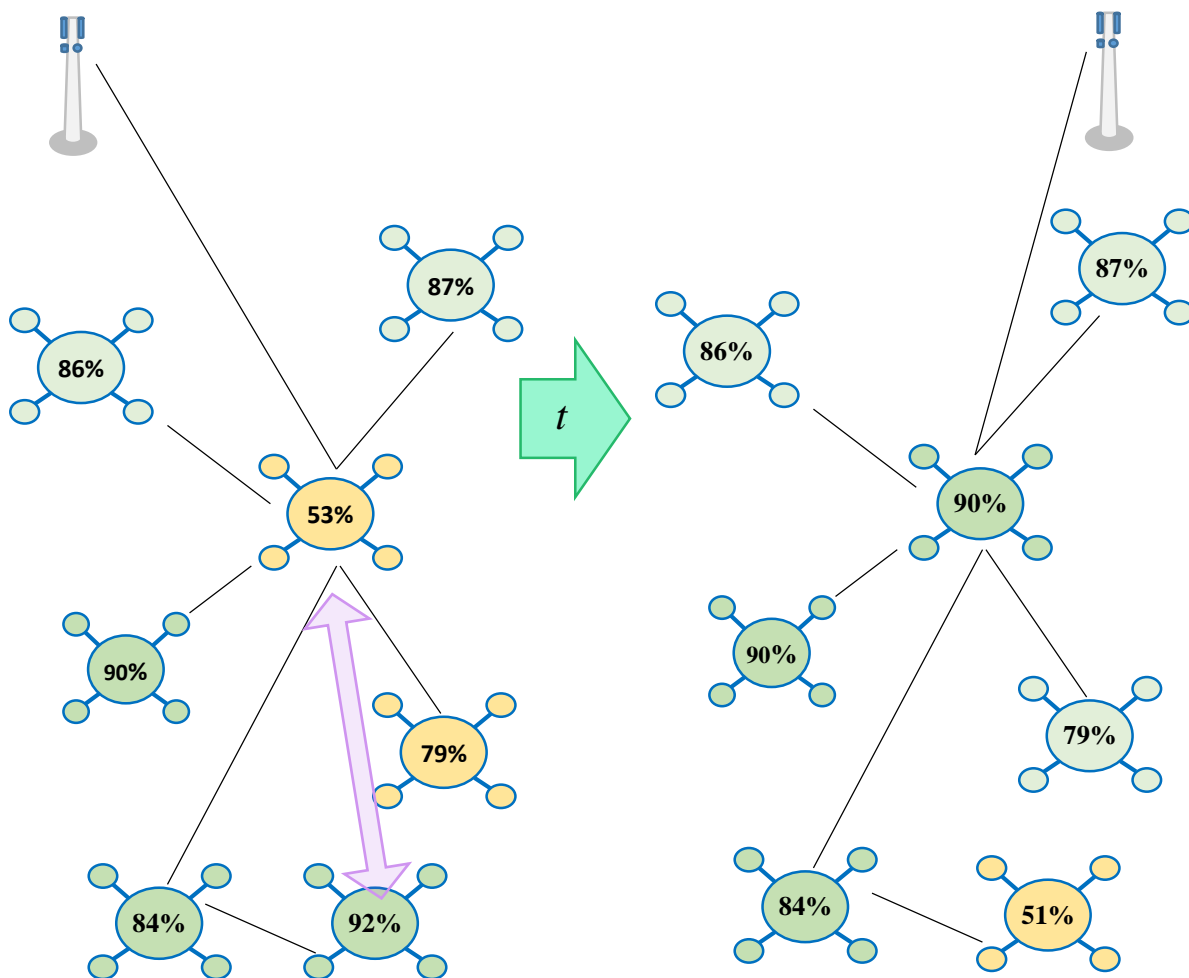


Рис. 3.9. Схематичне зображення заміни ролі вузла мережі задля корегування нерівномірного розряду акумулятора

Для досягнення найкращих показників енергоспоживання необхідно розглянути всі розглянуті методи з урахуванням топології мережі, її призначення та специфіки апаратних компонентів.

3.6. Дослідження маршрутизатора IEEE 802

Файли маршрутизації з реальних експериментів використовувалися для змодельованих експериментів. Виберіть такі параметри для моделювання:

а) Протокол зв'язку:

1) IEEE 802.11n (як один із найпоширеніших стандартів для дронів);

2) IEEE 802.15.4 використовується для експериментів і порівнянь (через енергоефективність і низьку вартість);

б) топології мереж:

1) зірка – найпоширеніший тип мережі;

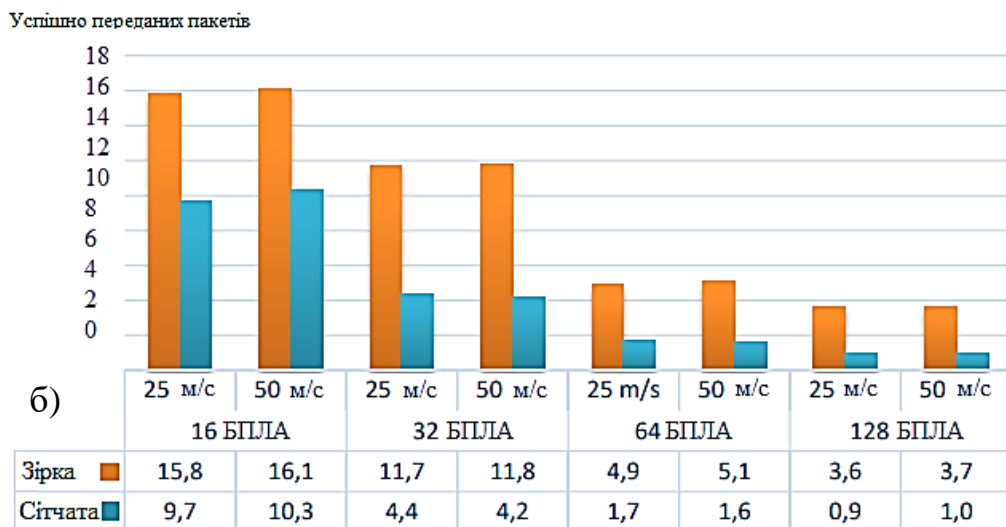
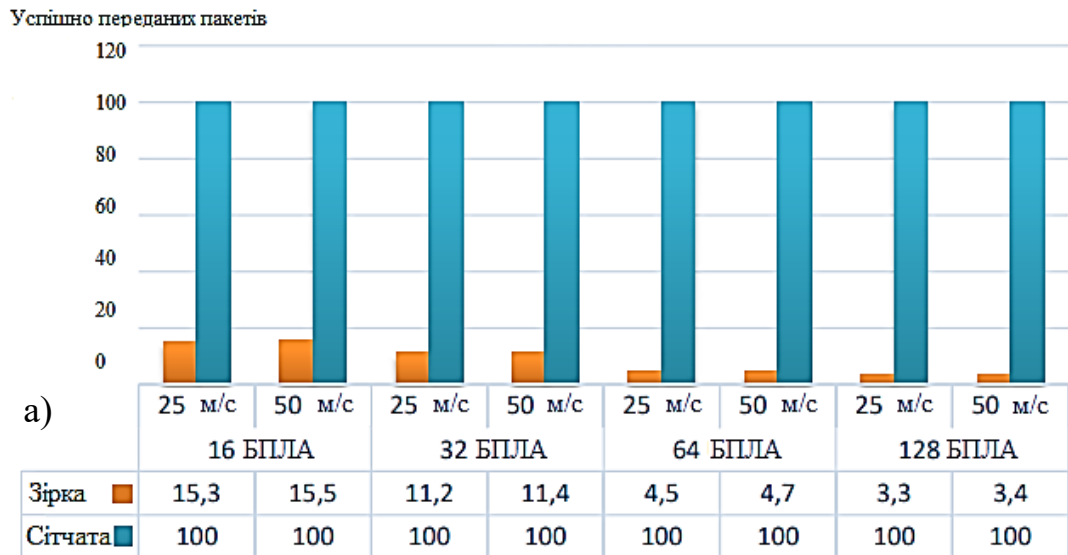
2) сітчата – характеристики мережі, сформованої за певний період часу;

в) кількість БПЛА: 16, 32, 62,64 та 128;

г) швидкість БПЛА: 25 м/с низька та 50 м/с висока.

Було вибрано чотири сценарії, які змінювали кількість хостів для покриття малих і великих мереж. Досл декілька місць розміщення хостів), відповідно [28]. Вертикальна та горизонтальна відстань між кожним місцем зафіксована на рівні 160 м. У всіх дослідженнях продуктивність мережі погіршувалася зі збільшенням кількості хостів, за винятком IEEE 802.11n із центральним протоколом збору даних (ПЦЗД), який мав високий рівень успішно переданих пакетів. Час моделювання для всіх експериментів становить тисячу секунд. На основі цього було проведено експеримент і порівняно швидкість успішно переданих пакетів. на рис. 3.10 показано результати для IEEE 802.11n (а) і IEEE 802.15.4 (b).

Протокол IEEE 802.15.4 показує результат зменшення кількості переданих пакетів при збільшенні швидкості мережі та кількості вузлів. Зі збільшенням кількості веб-хостів і використанням протоколу ПЦЗД результати погіршилися.



а) – результати для протоколу IEEE 802.11n;

б) – результати для протоколу IEEE 802.15.4.

Рис. 3.10. Результати експерименту для порівняння протоколів IEEE 802.11n та IEEE 802.15.4 по кількості успішно доставлених пакетів

На відміну від попередніх протоколів, поведінка IEEE 802.11n змінюється з використанням протоколу маршрутизації ПЦЗД. Без цього протоколу швидкість успішно переданих пакетів буде такою ж, як і IEEE 802.15.4 [27]. Використання протоколу маршрутизації ПЦЗД IEEE 802.11n призвело до майже 100% успішної доставки пакетів. Кількість хостів не впливає на роботу протоколів IEEE 802.11n і ПЦЗД.

На рис. 3.11 наведені результати дослідження зіркоподібної топології без використання протоколу ПЦЗД, а на рис. 3.12 – результати сітчастої топології, сформованої за протоколом ПЦЗД [27].

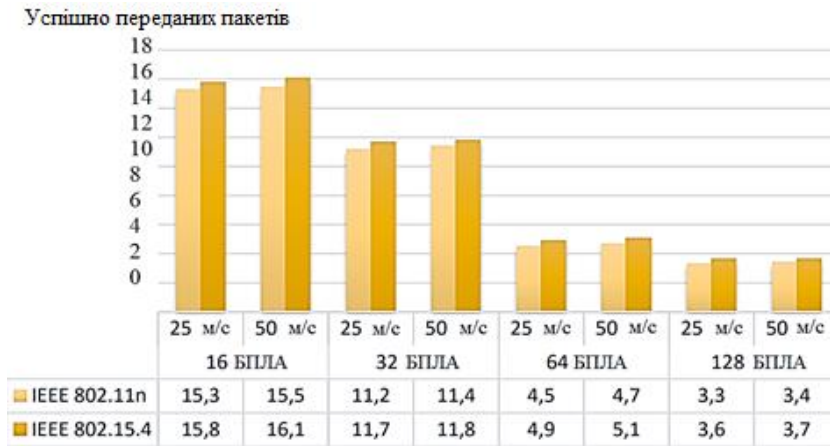


Рис. 3.11. Результати досліджень кількості успішно доставлених пакетів для топології-зірки

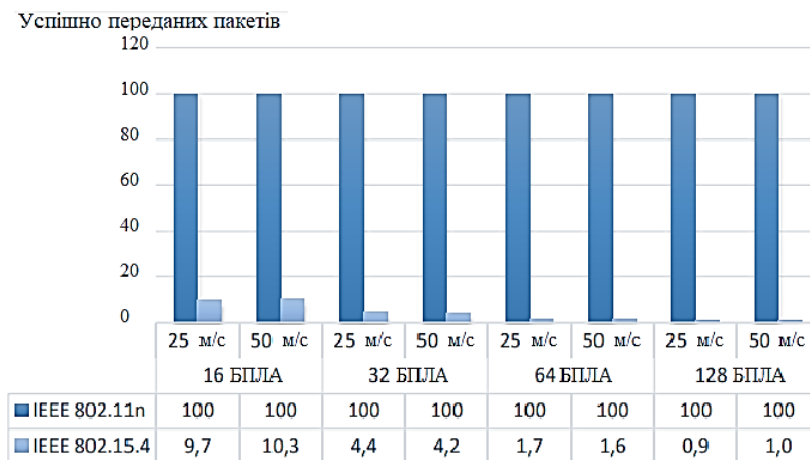


Рис. 3.12. Результати досліджень кількості успішно доставлених пакетів для сітчастої топології

Також були досліджені термінальні затримки, які вводяться кожним протоколом із зіркоподібною та сітчастою конфігураціями. Чим більше безпilotників приєднується до мережі, тим більша затримка протоколу IEEE 802.11n в обох випадках. Однак із зіркоподібною топологією швидкість стає ще більш важливою, оскільки затримка збільшується, як показано на малюнку

3.13. З іншого боку, топологія сітки не відрізняється при зміні швидкості (рис. 3.14).

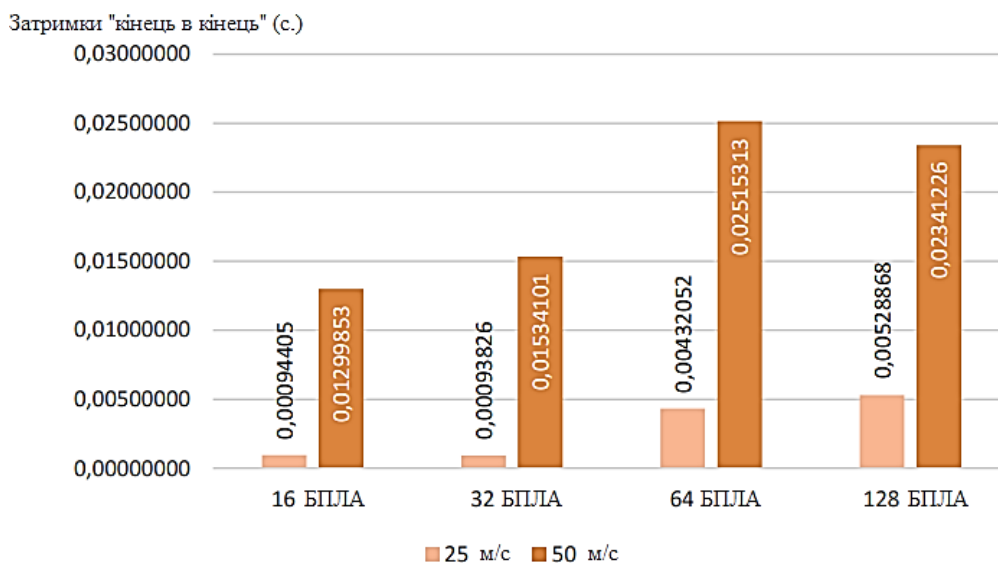


Рис. 3.13. Результати досліджень затримок «кінець в кінець» для протоколу IEEE 802.11n при топології – зірка

Наскрізний аналіз затримки IEEE 802.15.4 показує іншу поведінку. Якщо прийняти зіркову комбінацію, основним фактором, що збільшує затримку, є кількість дронів (рис.3.15) [27]. Для зіркоподібної топології, з іншого боку, затримка є значною, але не сильно змінюється при зміні кількості літаючих апаратів (рис.3.16).

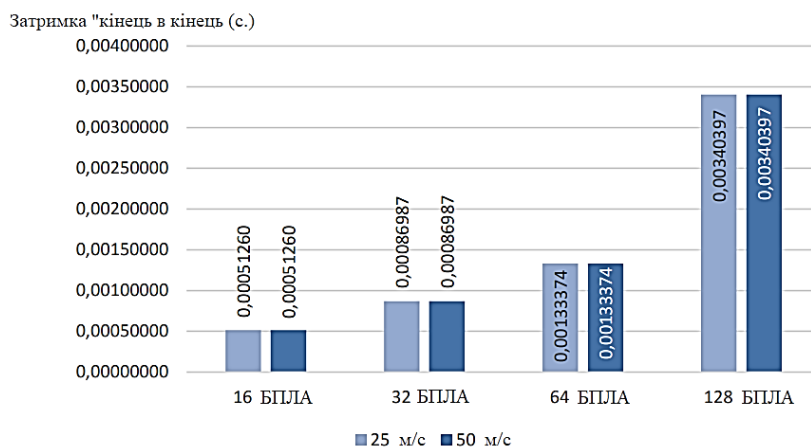


Рис. 3.14. Результати досліджень затримок «кінець в кінець» для протоколу IEEE 802.11n при сітчатій топології

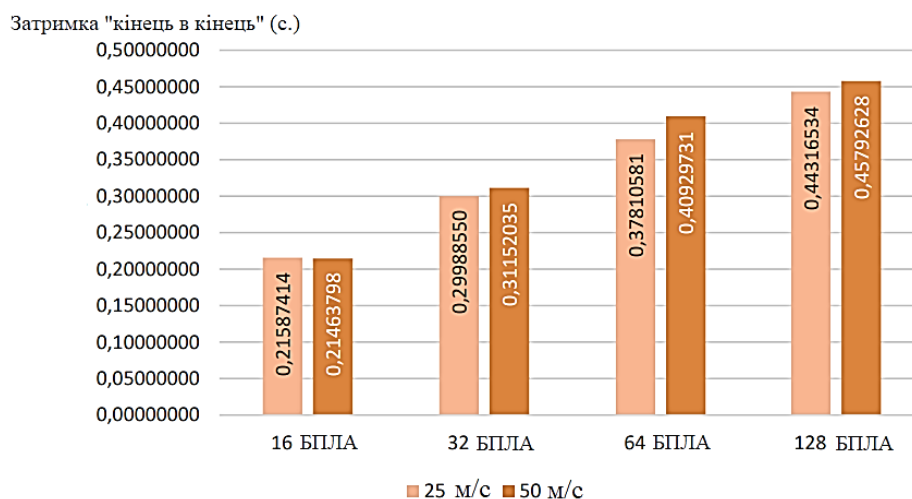


Рис. 3.15. Результати досліджень затримок «кінець в кінець» для протоколу IEEE 802.15.4 при топології – зірка

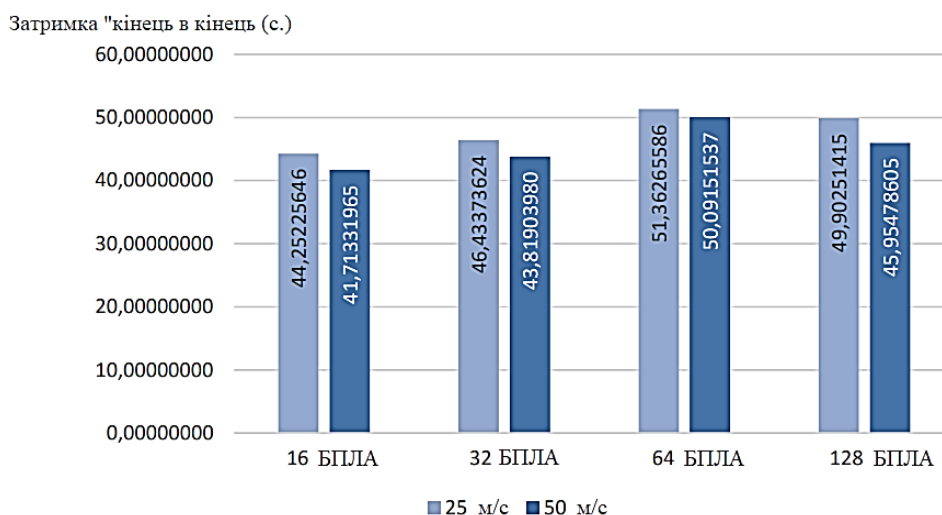


Рис. 3.16. Результати досліджень затримок «кінець в кінець» для протоколу IEEE 802.15.4 при сітчатій топології

ВИСНОВКИ ДО РОДІЛУ 3

Можна зробити невеликий висновок. У зіркоподібній топології використовується більше мережевих ресурсів. Тому виникає колізія. Крім того, через високу швидкість безпілота спостерігаються коливання надійного зв'язку між дроном і базовою станцією, що впливає на обмін даними. Можна зробити висновок, що дрони, які використовують сітчасту топологію IEEE 802.11n, безпечніші, ніж використання зіркової топології з

тим самим протоколом. Хоча IEEE 802.15.4 працює не набагато краще, ніж IEEE 802.11n у сітчастих топологіях, його слід розглядати в сітчастих топологіях і як предмет майбутніх досліджень через низьку вартість, енергоефективність і надійний зв'язок [27].

ВИСНОВОК

Під час виконання кваліфікаційної роботи були розглянуті всі типи безпілотників, тому їх запустили. Ми розібрали всі можливі алгоритми роутера для дронів, чим вони відрізняються, який краще і де вони доступні. Ми розглянули застосування дронів у різних галузях промисловості, таких як: сільське господарство, енергетика, геодезія, нафтогазова промисловість, гірничодобувна промисловість, безпека, будівництво, лісове господарство, поліція та військова промисловість. Подано загальний огляд мобільних ad hoc мереж MANET.

Детально розглянуто всі шість протоколів маршрутизації в мережах FANET:

- протоколи статичного маршрутизації
- протоколи проактивної маршрутизації;
- протоколи реактивної маршрутизації;
- гібридні протоколи маршрутизації;
- протоколи маршрутизації на основі географії /геопозиції;
- протоколи ієрархічного маршрутизації.

Проаналізовано можливі сценарії їх використання відповідно до основної ідеї латентних мереж та визначено їх ключові характеристики. Розраховано енергоефективність маршруту та запропоновано адаптивний метод руху БПЛА з точки зору уникнення перешкод на маршруті, а також наведено формулу сприйняття енергії для вираження енергоефективності на технічному рівні. Для вирішення проблеми нерівномірного розряду акумулятора запропоновано спосіб зміни ролі вузлів, коли розряд досягає певної межі

Окремо було проаналізовано протокол маршрутизації централізованого збору даних (ПЦЗД), розібрали всі переваги та недоліки його алгоритму маршрутизації.

Окреслено загальні принципи руху мережі та збору даних із всіх складових мережі.

У експериментальному дослідженні аналізуються широко використовувані протоколи бездротового обміну даними для дронів, а саме IEEE 802.11n і IEEE 802.15.4. Вивчається вплив застосування спеціальних протоколів векторної маршрутизації на запити залежно від таких факторів, як топологія мережі (наприклад, зірка або сітка) і кількість БПЛА. Виберіть фактори порівняння: кількість успішно переданих пакетів, швидкість дрона та затримку наскрізної доставки пакетів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Всеукраїнській центр волонтерів. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.peoplesproject.com/sho-take-bpla/> .
2. MANET Network in Internet of Things System - Rasa Bruzgiene, Lina Narbutaite and Tomas Adomkus, 2019 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.intechopen.com/books/ad-hoc-networks/manet-network-in-internet-of-things-system>.
3. New mobility metrics for MPRs selection in the OLSR protocol in Proc. 9th African Conference on Research in Computer Science, N. Enneya, K. Ouididi, and M. Elkoutbi, 2021. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.semanticscholar.org/paper/Selection-of-Stable-Paths-in-the-MANET-Network-Allali-Maaza/67ebf328c1d5fe926d9702448544decd2660cdae>.
4. Connected Multi UAV Task Planning for Flying Ad Hoc Networks, Ilker Bekmezci, Murat Ermis, Sezgin Kaplan, 2019 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6848998> .
5. On-Demand Multicast Routing Protocol. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99), S. Lee, M. Gerla, and C. Chiang, 1999. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020756600187> .
6. A Survey: Different Mobility Model for FANET - International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering Volume 5, Kanta Kumari*, Basant Sah, Sunil Maakar, 2022 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/328461698_A_Survey_Different_Mobility_Model_for_FANET.
7. A Mobility Aware Technique for Clustering on Mobile Ad-Hoc Networks Charalampos Konstantopoulos, Damianos Gavalas, Grammati Pantziou - Springer-

Verlag Berlin Heidelberg 2019 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F11947950_45 .

8. The clustering algorithm of UAV networking in near-space, in: 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, L. Kesheng, Z. Jun, Z. Tao, 2019 (ISAPE 2019) [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/251868614_The_clustering_algorithm_of_UAV_Networking_in_Near-space.

9. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review of Communication architectures, and Routing protocols, Khan, Ijaz Mansoor Qureshi, Alamgir Safi, Inam Ullah Khan, Muhammad Asghar, First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies, 2023[Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8277614>.

10. Flying Ad-Hoc Networks: Routing Protocols, Mobility Models, Issues, Muneer Bani Yassein and Nour Alhuda Damer, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 7, no. 6, pp.162-168, 2018. [Электронный] – Режим доступа: https://thesai.org/Downloads/Volume7No6/Paper_21-Flying_Ad-Hoc_Networks_Routing_Protocols_Mobility_Models_Issues.pdf .

11. Highly dynamic DestinationSequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for mobile computers, Perkins, C.E., Bhagwat, P. In: Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications (SIGCOMM '94), pp. 234–244 1994. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://people.cs.umass.edu/~mcorner/courses/691M/papers/perkins.pdf>.

12. Routing protocols in flying Ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges, O.K. Sahingoz, Journal of Intelligent & Robotic Systems, pp. 513-27 April 2020.

13. Application of Delay Tolerant Networking (DTN) in airborne networks. In: IEEE Military Communications Conference, Jonson, T., Pezeshki, J., Chao, V., Smith, K., Fazio, J., pp. 1–7 (2020) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4753464/?arnumber=4753464>.

14. Performance analysis of AODV and OLSR using OPNET, Singh, J.; Mahajan, R., Int. J. Comput. Trends Technol. 2020, 5, 114–117. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ijcttjournal.org/archives/ijctt-v5n3p121>.
15. Ad-Hoc Routing Performance Study Using OPNET Modeler, A. Zaballos, A. Vallejo, G. Corral and J. Abella, Barcelona, 2021.
16. Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks, A.I. Alshabtat, L. Dong, J. Li, F. Yang, International Journal of Electrical and Computer Engineering 6 (1), 2021, pp. 48–54. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/284046647_Low_latency_routing_algorithm_for_unmanned_aerial_vehicles_Ad-hoc_networks.
17. Ad-hoc network of unmanned aerial vehicle swarms for search & destroy tasks, V.R. Khare, F.Z. Wang, S. Wu, Y. Deng, C. Thompson, in: Intelligent Systems, IS, International IEEE Conference, 2022.
18. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks, David B. Johnson, David A. Maltz, Computer Science Department Carnegie Mellon University 5000 Forbes Avenue Pittsburgh, PA 15213-3891 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://slideplayer.com/slide/9406944/>.
19. Ad-hoc on-demand distance vector routing, Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, C.E. Perkins, E.M. Royer [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/749281>.
20. The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad-Hoc Networks, Z. J. Haas and M. R. Pearlman, IETF MANET working group, Internet draft, June 2019. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://people.ece.cornell.edu/haas/wnl/Publications/draft-ietf-manet-zone-zrp-02.txt>.
21. Zone Routing Protocol (ZRP), Clemence Kelly [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://slideplayer.com/slide/12947890/>.
22. Temporarily-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Internet draft, .

Park, V., Corson, S., IETFMANETworking group. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-tora-spec-04>.

23. Review of communication protocols for FANETs:(Flying Ad-Hoc Networks), M.A. Khan, S.M. Riaz, R.M. Asif and A.Shah, International Conference on Engineering and Emerging Technologies,2019. [Електронний ресурс] – Режим доступу:

https://www.researchgate.net/publication/311707613_Review_of_Communication_Protocols_for_FANETs_Flying_Ad-Hoc_Networks..

24. An analytical approach to position-based routing protocol for vehicular ad hoc networks, Raw, R.S., Lobiyal, D.K. and Das, S., SNDS'12, Springer (LNCS), ШТМ-К, Trivandrum, India, pp.147–156., 2019 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-34135-9_15.

25. The performance of greedy geographic forwarding in unmanned aeronautical ad-hoc networks, Rostam Shirani, Marc St-Hilaire, Thomas Kunz, Yifeng Zhou, Jun Li, Louise Lamont, 2023 Ninth Annual Communication Networks and Services Research Conference [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5771206>.

26. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks, В. Карп, Н.Т. Кунг, Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom, 2000 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.icir.org/bkarp/jobs/gpsr-mobicom2000.pdf>.

27. IEEE 802.11n vs. IEEE 802.15.4: a study on Communication QoS to provide Safe FANETs, Emerson A. Marconato, Jean Aimé Маха, Daniel F. Pigatto, Alex S. R. Pinto, Nicolas Larrieu [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7575372>.

28. "NavIRer" <https://naviter.com/ru/2019/09/how-it-works-fanet/> Стаття про FANET.

29. Статичні протоколи маршрутизації БПЛА [Електронний ресурс] – Режим доступу https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/39504/1/Zabrotsky_magistr.pdf .