

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій КРАВЧУК
«__» _____ 2021 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»
зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Розвиток методів маршрутизації в повітряних ad-hoc
мережах»**

Виконав:
студент II курсу, групи ТЗ-01мп
Єфименко О.С. _____

Керівник:
Доцент кафедри ТК, к.т.н.,
Валуйський С.В. _____

Рецензент:
Професор кафедри ІКТС НН ІТС, д.т.н., с.н.с.,
Скулиш М.А. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ___ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Єфименко Олексію Сергійовичу

1. Тема дисертації «Розвиток методів маршрутизації в повітряних ad-hoc мережах», науковий керівник дисертації доцент кафедри ТК Валуйський Станіслав Вікторович, к.т.н., затверджені наказом по університету від «04» листопада 2021 р. № 3672-с.
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2021 р.
3. Об'єкт дослідження - процес функціонування повітряних радіомереж із самоорганізацією FANET
4. Предмет дослідження - методи маршрутизації пакетів в повітряних радіомережах із самоорганізацією FANET
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Проаналізувати архітектуру та принципи функціонування мереж FANET
 2. Проаналізувати методи маршрутизації в мережах FANET
 3. Проаналізувати наявність удосконаленого методу маршрутизації в мережах FANET.

4. Оцінити ефективність застосування проаналізованих методів для мереж з різною частотою зміни топології мережі.
 5. Розробити стартап-проект.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу
1. Графічне зображення архітектури FANET мереж.
 2. Графічне зображення принципів роботи проаналізованих методів маршрутизації.
7. Орієнтовний перелік публікацій
1. Валуйський С.В., Єфименко О.С. Аналіз застосування методів маршрутизації в Ad Hoc мережах із БПЛА. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій 2021».
 2. Валуйський С.В., Єфименко О.С. Розвиток методів маршрутизації в повітряних ad-hoc мережах. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. № 1 2022. (в процесі).
9. Дата видачі завдання “21” вересня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підготовка і вивчення літератури	до 21.11.2020	виконано
2	Розробка вступу	до 17.01.2021	виконано
3	Розробка 1 розділу	до 09.04.2021	виконано
4	Розробка 2 розділу	до 11.07.2021	виконано
5	Розробка 4 розділу	до 01.10.2021	виконано
6	Розробка 4 розділу	до 21.11.2021	виконано
7	Підготовка доповіді	до 21.11.2021	виконано
8	Оформлення роботи	до 10.12.2021	виконано

Студент

Олексій ЄФИМЕНКО

Науковий керівник дисертації

Станіслав ВАЛУЙСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація «Розвиток методів маршрутизації в повітряних ad-hoc мережах» Складається з переліку умовних скорочень, вступу, основної частини що містить 4 розділи, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи - 129 сторінок. Робота містить 26 рисунків та 19 таблиць. Список використаних джерел включає 99 одиниць.

Відповідно до мети дослідження, в даній роботі проаналізовані алгоритми маршрутизації в FANET мережах із самоорганізацією. Проаналізовано архітектуру та функціонування БПЛА вузлів мережі.

Розроблено удосконалений метод маршрутизації на основі прогнозування мобільності вузлів і динамічним механізмом флуду в повітряних радіомережах із самоорганізацією FANET

Оцінено ефективність запропонованого методу.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, мережа Fanet, метод маршрутизації, топологія.

ABSTRACT

Master's thesis "Enhancement of routing methods in flying ad-hoc networks" consists of a list of abbreviations, introduction, main part, containing 4 sections, conclusions and a list of sources used. The total volume of the work is 129 pages. The work contains 26 figures and 19 tables. The list of used sources includes 99 units.

In accordance with the purpose of the study, this paper describes results of the analysis of the routing algorithms in self-organized FANET networks. The architecture and operation of UAV network nodes analyzed.

An improved routing method based on node mobility prediction and dynamic flood mechanism in aerial radio networks FANET with self-organization has been developed.

The effectiveness of the proposed method is evaluated.

Keywords: UAV, FANET network, routing method, topology.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	11
АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ FANET	11
1.1 Огляд основних властивостей та проблем в мережах Ad Hoc	11
1.2 Класифікація та параметри радіомереж із самоорганізацією	17
1.3 Сфери застосування радіомереж із самоорганізацією	19
1.3.1 Мережі радіозв'язку тактичної ланки управління	19
1.3.2. Mesh мережі	8
1.3.3. Сенсорні мережі	17
1.4 Переваги та перспективи радіомереж із самоорганізацією	23
ВИСНОВКИ	25
РОЗДІЛ 2	26
АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ	26
2.1 Аналіз методів маршрутизації в стаціонарних мережах	26
2.1.1 Схема системного аналізу і синтезу методів маршрутизації в радіомережах із самоорганізацією	37
2.2. Методи однокористувацької маршрутизації інформаційних потоків у мережах з динамічною топологією	41
2.2.1. Таблично-орієнтовані методи маршрутизації	42
2.2.2. Оцінка ефективності таблично-орієнтованих методів маршрутизації	50
2.2.3 Зондові методи маршрутизації	52
2.2.4 Оцінка ефективності зондових методів маршрутизації	58
2.2.5. Гібридний метод маршрутизації	60
ВИСНОВКИ	63
РОЗДІЛ 3	65
УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ В МЕРЕЖАХ FANET	65

3.1 Огляд FANET мереж відносно методів маршрутизації	65
3.2 Маршрутизація в мережах із БПЛА	66
3.2. Реактивна маршрутизація	67
3.3 Географічна маршрутизація	68
3.4 Реактивно-географічна комбінація	69
3.5 Протокол на базі масштабного флуду (Scoped flooding)	70
3.6 Протокол на основі прогнозування мобільності	71
3.7 RGR протокол	72
3.8 Контрольні повідомлення	74
3.9 Таблиці вузлів	74
3.10 Перехід на Greedy Geographic Forwarding	74
3.11 Обробка отриманого пакета	75
3.12 Взаємодія в вузлах призначення	75
3.13 Огляд Reactive-Greedy-Reactive	76
3.14 RGR з масштабним флудом (scoped flooding)	77
3.15 RGR з прогнозуванням мобільності	79
3.16. Оцінювання Reactive-Greedy-Reactive	83
3.17 Результати симуляції	85
ВИСНОВКИ	90
РОЗДІЛ 4	91
РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	91
4.1 Опис ідеї проекту	91
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	92
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	93
ВИСНОВКИ	96
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

FANET	(Flying ad-hoc network) - повітряна ad-hoc мережа
БПЛА	безпілотний літальний апарат
МБС	мобільна базова станція
WMN	(Wireless Mesh network) - бездротова комірчаста мережа
MANET	(Mobile Ad-hoc Network) - мобільна ad-hoc мережа
ОСІ	
QoS	(Quality of Service) - задана якість послуги
DVA	(Distance Vector Algorithms) - дистанційно-векторний алгоритм
LSA	(Link State Algorithms) - алгоритм стану зв'язку
ЦУМ	центр управління мережею
ММ	метод маршрутизації
HTTP	(Hyper Text Transfer Protocol) – протокол передачі даних
IP	(Internet Protocol) - протокол міжмережевого рівня
OLSR	(Optimized Link State Routing Protocol) - протокол оптимізованої маршрутизації стану зв'язку
RIP	(Route Information Protocol) - протокол маршрутної інформації
OSPF	(Open Shortest Path First) - протокол відкриття найкоротшого маршруту першим
ICMP	(Internet Control Message Protocol) - протокол контрольних повідомлень
DSDV	(Destination Sequenced Distance Vector) - протокол динамічної векторної маршрутизації
ADV	(Adaptive Distance Vector Routing) - протокол адаптивної векторної маршрутизації

ВСТУП

Актуальність теми. Радіомережі із самоорганізацією припускають можливість організації бездротової мережі без участі людини або з її мінімальною участю. Дана архітектура мережі отримала назву Ad Hoc. Основою для створення таких мереж є високий рівень "інтелектуальності" сучасних радіотерміналів, що містять крім приймально-передавальних блоків досить продуктивні обчислювальні засоби - процесор, пам'ять великої ємності, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми.

Однак, незважаючи на тривалий час розробки мереж із самоорганізацією, і сьогодні залишаються невирішеною значна кількість проблем, що перешкоджають широкому поширенню таких мереж в загальній глобальній структурі телекомунікацій. Серед основних проблем слід виділити наступні: організація надійної передачі даних при динамічній структурі і топології мережі; проблема ефективного використання ресурсів вузлів (більшість вузлів мережі можуть бути портативними і відповідно обмежені в своїх ресурсах: по продуктивності процесора, ємності пам'яті та енергоємності батарей); забезпечення заданої якості обслуговування для різних типів трафіку, пов'язаного зі швидкістю передачі, з затримкою і втратою пакетів, часом відновлення зв'язності після її втрати.

У цьому документі проаналізовані структура та особливості застосування радіомереж із самоорганізацією. Визначено переваги та недоліки існуючих протоколів самоорганізації, що використовуються в мережах FANET, та знайдено вдосконалений метод маршрутизації, який може суттєво знизити час пошуку правильного маршруту, затримку пакетів та час передачі даних, підвищити шанс доставки повідомлення без втрати інформації до вузла призначення.

Таким чином, *об'єктом досліджень* є процес функціонування повітряних радіомереж із самоорганізацією FANET.

Предмет досліджень - методи маршрутизації пакетів в повітряних радіомережах із самоорганізацією FANET.

Мета досліджень - удосконалення методів маршрутизації в повітряних радіомережах із самоорганізацією FANET шляхом мінімізації кількості службової інформації, що передається між вузлами мережі.

Для досягнення мети поставлено наступні завдання:

1. Проаналізувати архітектуру та принципи функціонування мереж FANET
2. Проаналізувати методи маршрутизації в мережах FANET
3. Проаналізувати наявність удосконаленого методу маршрутизації в мережах FANET.
4. Оцінити ефективність застосування проаналізованих методів для мереж з різною частотою зміни топології мережі.
5. Розробити стартап проект

Наукова новизна дослідження - удосконалено метод маршрутизації пакетів в повітряних радіомережах із самоорганізацією FANET. Суть удосконалення моделі, що визначає її новизну, полягає в тому, що запропоновано:

1. Прогнозування мобільності вузлів в повітряних радіомережах із самоорганізацією FANET.

2. Динамічний механізм флуду RREQ пакетів в повітряних радіомережах із самоорганізацією FANET.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ ТА ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ FANET

1.1 Огляд основних властивостей та проблем в мережах Ad Hoc

Мережі Ad Hoc, що в даному випадку означає "випадкова, спонтанна" або "спеціально створена для певних цілей", складаються з бездротових вузлів. Під вузлом мережі розуміється бездротовий комунікатор (переносний комп'ютер, транспортний засіб, сенсорний пристрій, робот і т.п.), оснащений радіомодемом. Вузли зв'язані один з одним в межах взаємної зони радіозв'язку, яка визначається параметрами радіопередавальних пристроїв, рельєфом місцевості і умовами поширення радіохвиль. Відмінною особливістю кожного вузла є його здатність виконувати функції як хоста, тобто джерела і приймача інформації, так і маршрутизатора інформаційних і службових пакетів інших абонентів радіомережі.

Вузли мережі можуть бути як стаціонарними, так і мобільними, однорідними або різнорідними (що відрізняються потужністю передавача, ємністю своїх батарей живлення, потужністю процесорів і т.д.), а також можуть розміщуватися на місцевості або в просторі і випадковим, і детермінованим способом. При цьому процес передачі інформації в даних мережах здійснюється без будь-якого центру управління. Це означає, що кожен вузол повинен самостійно виконувати певний набір функцій управління передачею інформації по мережі. Відсутність постійної інфраструктури та децентралізованого управління - характерні риси радіомереж із самоорганізацією.

Сферами застосування мереж Ad Hoc і MANET є, в першу чергу, мережі зв'язку військового призначення тактичного рівня, а також мережі, що розгортаються в умовах надзвичайних ситуацій та природних катаклізмів.

Цивільними сферами застосування є: домашні мережі і мережі підприємств, сенсорні (телеметричні) мережі різного призначення, мережі контролю та диспетчеризації транспортних засобів, мережі, створювані в віддалених районах, де відсутня стаціонарна інфраструктура (сільська місцевість, пустелі, Арктика і Антарктика, тундра, тайга і т.д.).

Характерними особливостями даних мереж (на відміну від мереж з стаціонарною інфраструктурою) є наступні ознаки:

1. Змінна кількість вузлів і площа покриття мережі. Кількість вузлів мережі може варіюватися від десятків до десятків або сотень тисяч вузлів. Залежно від кількості вузлів, потужності їх передавачів і використовуваних частот географічний простір покриття мережі може змінюватися в широких межах.

2. Мобільність і стаціонарність вузлів. Стаціонарні Ad Hoc мережі зберігають незмінність місця розташування вузлів, але припускають їх довільне включення в мережу і від'єднання з мережі. Мобільні радіомережі із самоорганізацією MANET (Mobile Ad Hoc Networks) передбачають можливість переміщення будь-якого вузла мережі.

3. Випадковість топології мережі, її неоднорідність і динамічність зміни. Оскільки абоненти мережі можуть бути мобільними, то топологія мережі може постійно змінюватися. Крім того, кожен вузол може мати різні радіо ресурси та обчислювальні потужності - мати різну потужність передавача, мати можливість змінювати рівень потужності передавача або діаграму спрямованості антени, бути оснащеним акумуляторними батареями різної ємності.

4. Принцип організації передачі інформації - комутація пакетів з використанням багатокрокової маршрутизації. Цей принцип полягає в тому, що кожен вузол мережі, будучи передавачем і приймачем "власної" інформації, виступає в якості ретранслятора і маршрутизатора пакетів інших абонентів мережі. Під маршрутизацією розуміється направлення пакетів на певні адреси або ретрансляція сигналів в певних напрямках.

5. Децентралізований тип управління. Таке управління передбачає автономність вузлів в прийнятті рішень по організації передачі за визначеними маршрутами. Іншими словами, в мережі відсутня будь-яка фіксована інфраструктура для передачі службової інформації чи іншого виду централізованого управління (на відміну від звичайних телекомунікаційних мереж з системами управління [93, 94]). Кожен вузол визначає маршрут передачі - послідовність вузлів-ретрансляторів на основі попереднього або оперативного збору інформації про стан мережі і зв'язності її абонентів відповідно до протоколів маршрутизації, спеціально розробленими для мереж із самоорганізацією.

6. Динамічність зміни зв'язності при пересуванні вузлів і / або приєднання / від'єднання вузлів в мережу. Це вимагає контролю за проходженням пакетів по мережі, зміни маршрутів пакетів при порушеній зв'язності, а також відновлення передачі повідомлень з моменту втрати зв'язності. Такий характер роботи мереж призводить до зміни якості обслуговування мережею (затримка і втрата пакетів, повна втрата зв'язності). Тому в мережах із самоорганізацією повинні бути передбачені механізми підтримки якості обслуговування за рахунок, наприклад, передачі пакетів по декільком маршрутам, колективної ретрансляції пакетів.

7. Багатоканальність мереж. Кожен вузол може бути обладнаний одним або декількома приймально-передавальними пристроями, що

працюють в різних частотних смугах. Таким чином, крім комутації пакетів в одному частотному каналі можлива комутація каналів.

8. Масштабованість. При масштабованості мережа легко збільшується і змінює кількість своїх вузлів. Збільшення розміру мережі до сотень і тисяч вузлів може вимагати введення локалізації управління, тобто поділ всієї мережі на кластери з власними протоколами маршрутизації і міжкластерною ретрансляцією через вузли-шлюзи. Можливо і введення ієрархії в мережі, коли на основі вузлів, що мають достатні ресурси або гарне місце розташування (наприклад, на вершинах пагорбів), здійснюється прямий зв'язок між кінцевими абонентами або кластерами через мінімальну кількість ретрансляцій.

9. Обмеженість ресурсів вузлів мережі. Вузол мережі має обмежені ресурси (ємність пам'яті, продуктивність процесора, потужність передавача і енергоємність батарей). Енергія батарей витрачається як на комунікаційну (прийом, передача, обробка повідомлень і ін.), так і на обчислювальну (процесор) складові. Економія енергії батарей живлення - одне із завдань розробників терміналів і протоколів взаємодії.

10. Обмежена безпека. Широкомовна природа радіоканалу дозволяє зловмиснику (противнику) здійснювати прослуховування передач вузлів, аналізувати мережевий трафік і порушувати або погіршувати роботу мережі, ставити активні і пасивні перешкоди. Тому в мережі повинні бути вжиті заходи, які мінімізують або виключають можливий навмисний негативний вплив на роботу мережі. Таким заходом може бути застосування на фізичному рівні складних радіосигналів, наприклад надширокосмугових.

Розвиток елементної бази і більші обчислювальні потужності на сьогоднішній день визначили різноманіття радіомереж із самоорганізацією (рис. 1.1):

- мережі Ad Hoc - мережі з випадковими, але стаціонарними абонентами;
- мобільні радіомережі (мережі MANET) - мережі мобільних абонентів, які реалізують повністю децентралізоване управління (відсутність базових станцій);
- mesh мережі (MESH) - такі мережі складаються з бездротових стаціонарних маршрутизаторів (створюють бездротову магістраль і зону обслуговування абонентів) і мобільних / стаціонарних абонентів, що мають доступ (в межах зони радіозв'язку) до одного з маршрутизаторів;
- сенсорні (телеметричні) мережі, що складаються з малогабаритних сенсорних вузлів з інтегрованими функціями моніторингу певних параметрів навколишнього середовища, обробки і передачі даних по радіоканалах;
- автомобільні мережі (мережі VANET) - мережі зв'язку транспортних засобів.
- Повітряні мережі (мережі FANET) - мережі на основі БПЛА.

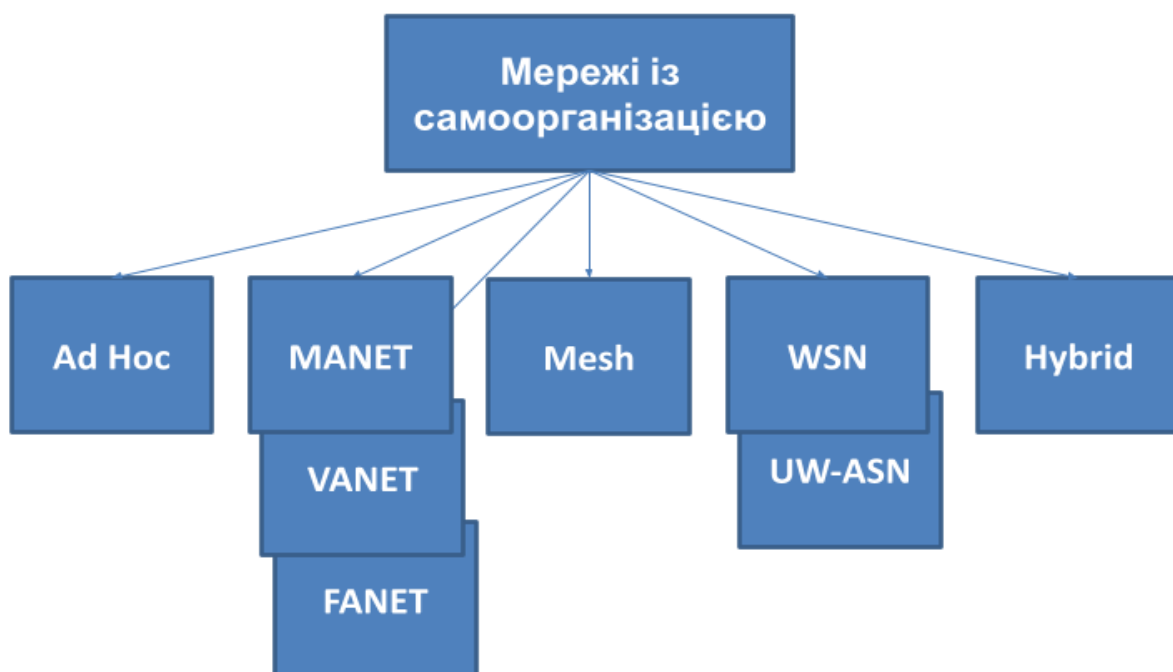


Рис.1.1 Класифікація мереж із самоорганізацією

Однак, незважаючи на тривалий час розробки мереж із самоорганізацією, і сьогодні залишаються невирішеною значна кількість проблем [99], що перешкоджають широкому поширенню таких мереж в загальній глобальній структурі телекомунікацій. Серед них можна виділити такі проблеми.

1. Організація надійної передачі даних при динамічній структурі і топології мережі

2. Підвищення швидкості передачі інформації, яка зазвичай обмежена виділеним частотним ресурсом і методами доступу абонентів до колективно використовуваного ресурсу.

3. Створення ефективних методів (алгоритмів) управління на різних рівнях "Еталонної моделі" відкритих систем Всесвітньої організації зі стандартизації (ЕМВОС) стосовно конкретної радіомережі із самоорганізацією. Поява нових технологій радіозв'язку (МІМО, систем визначення геопозиції, широкосмугові і надширокосмугові сигнали та ін.), А також різні прикладні застосування вимагають створення нових методів управління даними мережами, в тому числі використання методів штучного інтелекту.

4. Проблема ефективного використання ресурсів вузлів (більшість вузлів мережі можуть бути портативними і відповідно обмежені в своїх ресурсах: по продуктивності процесора, ємності пам'яті та енергоємності батарей та ін.).

5. Забезпечення заданої якості обслуговування для різних типів трафіку, пов'язаного зі швидкістю передачі, з затримкою і втратою пакетів, часом відновлення зв'язності після її втрати.

6. Проблема масштабованості і адресації в мережах при організації радіомереж із самоорганізацією великого розміру.

7. Взаємодія з мережами загального користування та мережею Інтернет.

8. Забезпечення безпеки в умовах децентралізованого управління і ширококомовної природи радіоканалу.

1.2 Класифікація та параметри радіомереж із самоорганізацією

Основні властивості, параметри і приклади радіомереж із самоорганізацією.

До основних параметрів систем радіомереж із самоорганізацією можна віднести:

- кількість і мобільність вузлів мережі, розміри мережі (географічної території) і щільність розміщення вузлів;

- зв'язність - забезпечується можливість обміну інформацією між вузлами безпосередньо один з одним (зв'язок прямої видимості) або використовується ретрансляція переданих повідомлень; різна потужність передачі вузлів призводить до появи як симетричних, так і асиметричних каналів;

- мережева топологія - визначається положенням вузлів і зв'язками між ними; може характеризуватися динамікою її зміни, викликані як мобільністю самих вузлів, так і зовнішніми чинниками пов'язаними із перешкодами;

- тип трафіку - залежить від призначення мереж (мова, передача даних, відео, телеметрія та ін.);

- зовнішнє середовище - визначає умови функціонування мережі (місто, ліс, гори, поле бою і т.д.).

На рис. 1.2 подано класифікацію самоорганізованих радіомереж по [1-8]:

1. способу побудови системи управління мережею - однорівневі (flat) і ієрархічні;

2. мобільності вузлів мережі - стаціонарні, мобільні і гібридні;

3. способу поділу радіо ресурсу - з детермінованим, випадковим або

гібридним способом поділом радіосервісу;

4. способу синхронізації - синхронні і асинхронні;

5. ширині смуги пропускання радіоканалу - вузькосмугові, широкосмугові і надширокосмугові (UWB);

6. складом обладнання вузлів: одноканальні та багатоканальні (один вузол містить кілька приймачів); однорідні і неоднорідні (радіотермінали з різною потужністю і продуктивністю процесора, об'ємом пам'яті, ємністю батареї і ін.); мають або не мають систему позиціонування (наприклад, GPS); мають всеспрямовані антени або антени з наведеною діаграмою спрямованості (наприклад, MIMO);

7. площею покриття: персональні (Personal, PAN) - до 10 м, локальні (Local, LAN) - до 500 м, міські (Metropolitan, MAN) - до 20-50 км, широкомасштабні (Wide, WAN) - більше 50 км;

8. призначенню: військові (поле бою), домашні, офісні, аварійні та ін. (більш докладно в табл. 1.1);

9. типу трафіку: мережі передачі даних, мови, відео, телеметричної інформації.

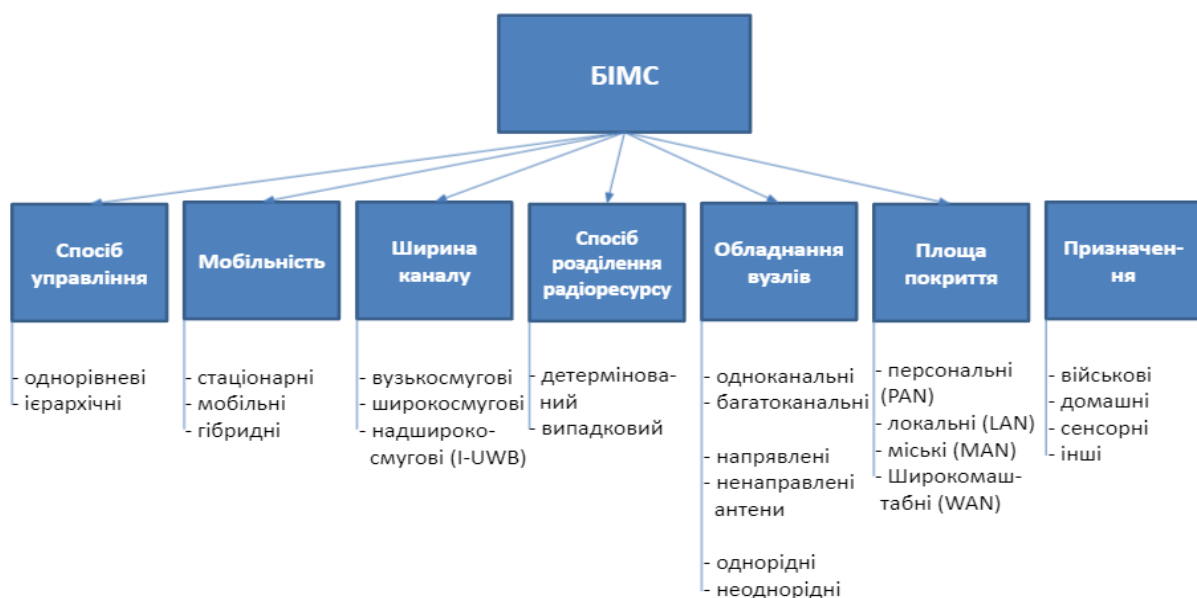


Рис. 1.2. Класифікація радіомереж із самоорганізацією

1.3 Сфери застосування радіомереж із самоорганізацією

Таблиця 1.1

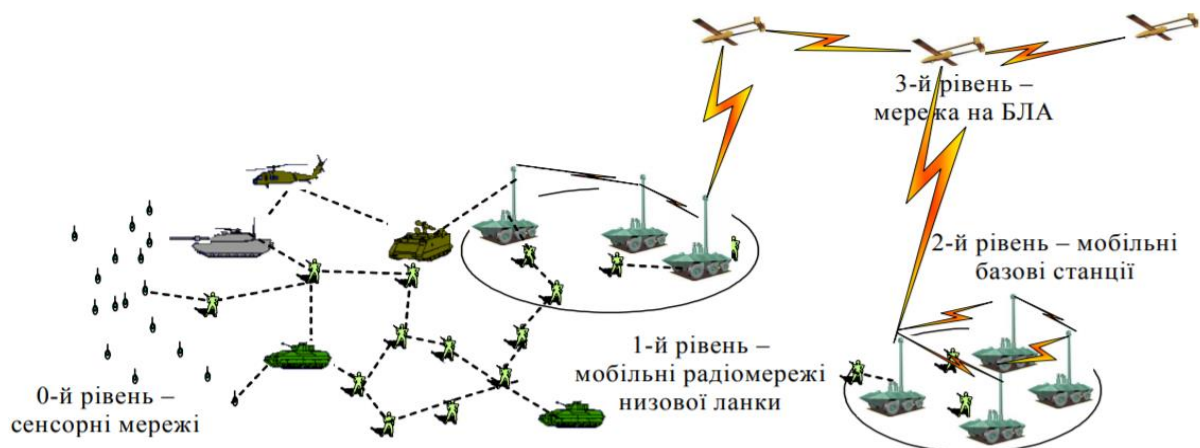
Сфера	Призначення
Тактичні мережі	Мережі військового призначення, в основному тактичного рівня
Сенсорні мережі	Домашнього, промислового і військового застосування, призначені для моніторингу навколишнього середовища: переміщення тварин; хімічний, біологічний аналіз рослин для сільського господарства; динаміка погодних умов; переміщення противника і ін.
Аварійні мережі	Пошукові і рятувальні операції. Заміна фіксованих мереж в разі стихійних лих (землетрус, ураган і т.д.)
Комерційні мережі	Електронна комерція, наприклад електронний платіж в будь-якому місці (наприклад, таксі) Бізнес: динамічний доступ користувача до бази, мобільний офіс. Сервіс при переміщенні на транспортному засобі: новини, відомості про стан дороги та ін.
Домашні мережі та мережі підприємства	Бездротові домашні мережі для різних додатків. Персональні мережі
Мережі навчання	Віртуальні класи, проведення конференцій
Розважальні мережі	Ігри з багатьма гравцями, домашні роботи, зовнішній доступ до Інтернету
Позиційний сервіс	Інформаційні послуги: автоматична переадресація виклику, координати заправної станції і ін.

1.3.1 Мережі радіозв'язку тактичної ланки управління

Більшість розвинених країн світу розглядають застосування самоорганізованих радіомереж із самоорганізацією на прикладі військових

мереж в якості перспективи розвитку систем зв'язку тактичного і оперативно-тактичного рівня [9]. Мобільний компонент (сукупність мереж із самоорганізацією, що мають здатність до переміщення, згортання і розгортання вузлів) повинний забезпечити інформаційний обмін інформацією в інтересах усіх військ, які діють в тактичній зоні незалежно від їх підпорядкування і завдань, які вони виконують. Передбачається, що її архітектура неоднорідна, ієрархічна і буде складатися з наступних основних рівнів) (рис. 1.3) [10-11]:

- 0-й рівень - який можуть створювати сенсорні мережі (мережі телеметрії);
- 1-й рівень - мобільні радіомережі низової ланки управління - бойові радіомережі;
- 2-й рівень - мережі мобільних базових станцій (МБС), що утворюють опорну мережу;
- 3-й рівень - повітряна (космічна) мережу, яка може бути



реалізована на безпілотних літальних апаратах (супутниках).

Рис. 1.3. Перспективна архітектура мобільної компоненти

Створення (введення) кожного рівня мобільної компоненти

передбачає поліпшення показників якості функціонування всієї системи радіозв'язку. Кожен рівень мобільної компоненти використовує свій діапазон частот. Основні характеристики складових мобільної компоненти наведені в табл. 1.2.

1-й рівень (рис. 1.4 являє собою сукупність радіомереж із самоорганізацією низової ланки управління. Мобільні абоненти (військовослужбовець, солдат, танк, бронетранспортер, вертоліт і т.п.) оснащені радіотерміналами (переносними комп'ютерами з прийомопередавачами), які реалізують функції маршрутизації. Абоненти здійснюють інформаційний обмін безпосередньо між собою або використовують ретрансляцію (маршрутизацію) повідомлень. В якості ретранслятора (точніше, маршрутизатора) може виступати будь-який мобільний абонент свого рівня, а також елементи другого (і навіть третього) рівня ієрархії, які знаходяться з ним в межах радіозв'язку.

Таблиця 1.2

Основні характеристики	Бойові радіомережі - 1-й рівень	Мережа МБС - 2-й рівень	Сенсорні мережі - 0-й рівень	Мережа на літальних апаратах - 3-й рівень
Розмірність	Сотні - тисячі	Десятки	Сотні - тисячі	Десятки
Принцип організації та побудови	Самоорганізація мережі, комутація пакетів, кожен вузол - маршрутизатор інформаційних повідомлень			
Мобільність	Висока	Низька	Низька	Дуже висока
Тип і спосіб управління	Розподілений, технологічний	Зоновий, організаційно-технологічний	Розподілений (ієрархічний), технологічний	Зоновий, організаційно-технологічний

Спосіб розподілу радіоресурсу	Випадковий	Детермінований, гібридний	Випадковий	Детермінований
Потужність передавача терміналу; відстань зв'язку і швидкість передачі (залежить від частоти, потужності передавача, типу антени і т.п.)	Солдат - одиниці Вт, до 1 км; транспортний засіб - десятки Вт, декілька км; 0.01-1 Мб/с	Десятки Вт; до 10-20 км; між МБС > 20 Мб/с (радіоканал), між МБС > 100 Мб/с (оптичний канал); між МБС-МА - 0.01-1 Мб/с; між МБС-БЛА >> 20 Мб/с	Визначається типом сенсорів; (Для наземних - мВт, сотні метрів, > 0,01 Мб/с)	Десятки Вт; десятки км; > 20 Мб/с

Переваги мереж із самоорганізацією очевидні: відсутність етапу планування (можливість самоорганізації), швидке розгортання, децентралізоване управління (дуже висока живучість), робота в русі всіх елементів мережі і т.п. (Табл. 1.3).

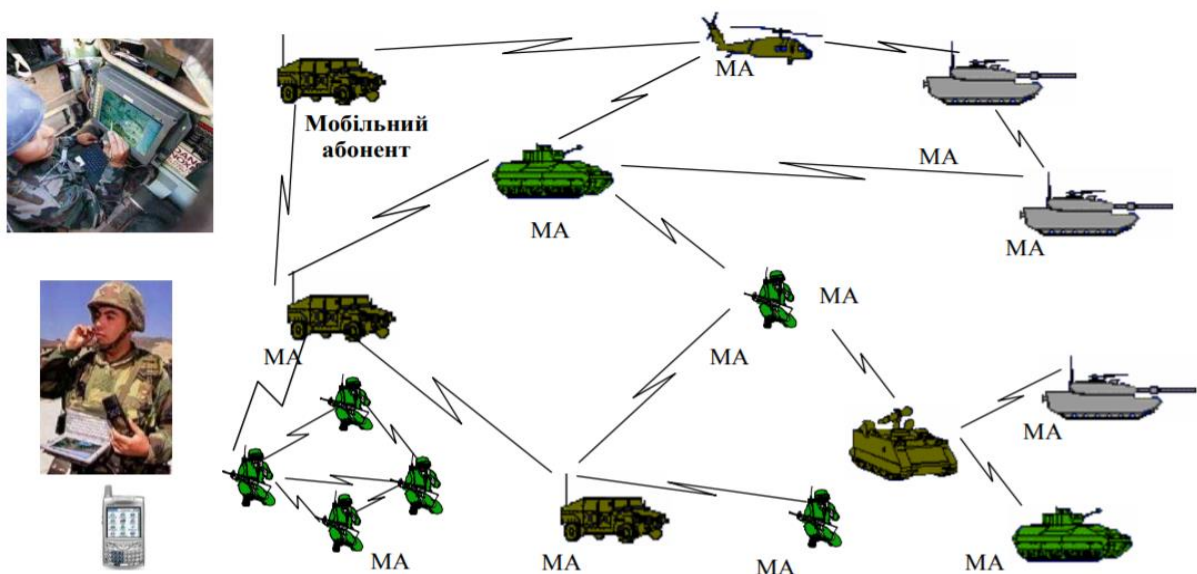


Рис. 1.4. MANET мережі військового призначення

Таблиця 1.3

Переваги (+) і недоліки (-) радіомереж із самоорганізацією	Засоби досягнення переваги
Висока живучість, мобільність всіх елементів мережі (+)	Управління мережею - децентралізоване, здатність до самоорганізації. Кожен вузол - маршрутизатор, адаптація до умов функціонування
Висока швидкість передачі в радіоканалі - потенційно 1-54 Мб/с (+)	Зсув діапазону частот (сотні МГц, одиниці ГГц). Напрямки вдосконалення: адаптація протоколу IEEE 802.11 до тактичних вимог (QoS, пріоритети і т.п.). Оптимізація використання радіоресурсу. Застосування спрямованих антен (інтелектуальні фазові решітки), технології MIMO (Multiple Input Multiple Output). Застосування надширокопосмугових сигналів
Висока продуктивність мережі (+)	Застосування ефективних методів управління мережею (маршрутизації, управління топологією, управління енергоресурсом, управління навантаженням і т.п.). Введення додаткових рівнів ієрархії (мобільних базових станцій, безпілотних літальних апаратів, супутників)
Невелика відстань безпосереднього зв'язку (-)	Використання зв'язку в умовах прямої видимості - залежність дальності зв'язку від частоти, потужності, типу антени і т.п. Використання маршрутизації в мережі

Передача різних видів трафіку (+)	Застосування ефективних протоколів фізичного, каналного, мережевого і транспортного рівнів (протоколів QoS). Координація взаємодії протоколів OSI. Інтелектуалізація процесів прийняття рішень з управління мережею
Маршрутизація (+)	Застосування ефективних методів маршрутизації
Високий рівень безпеки (+)	Застосування гібридних систем захисту (симетричних і асиметричних), створення розподілених трастових центрів, систем виявлення вторгнень і т.п.
Високий ступінь захисту від перешкод (+)	Використання ширококутових сигналів (метод частотних стрибків - FHSS, метод прямої послідовності - DSSS), в перспективі - застосування гібридних схем розподілу ресурсів (FDMA / TDMA / CDMA), застосування надширококутових сигналів

Можна виділити вимоги до перспективних радіозасобів військового призначення:

- висока пропускна здатність радіоканалу (> 200 Кб/с)
- використання декількох діапазонів і багатофункціональність (FDMA / TDMA / CDMA), в перспективі - використання імпульсних надширококутових сигналів;
- здатність програмування всіх видів і режимів роботи;
- автоматизація процесів зв'язку (режим - Plug-and-Play) і можливість самоорганізації мережі;
- інтелектуальність, децентралізованість та оптимізація функцій управління мережевими ресурсами (маршрутизація, навантаження, топологія, радіоресурс, безпека і т.д.) [1];

- робота з різними видами трафіку (голос, дані, відео);
- наявність системи позиціонування, спрямованих антен, робота в русі;
- модульність виконання, відкрита архітектура, низьке енергоспоживання.

У той же час існують вагомні труднощі створення радіомереж із самоорганізацією - необхідність вирішення значної кількості наукових проблем (маршрутизація, розподіл радіо ресурсів, управління потужністю, управління топологією, децентралізоване управління, безпека, забезпечення заданої якості передачі інформації і т.п.) при обмеженнях на ресурси радіо терміналів (за обсягом пам'яті, продуктивності процесора, енергоємності батареї і т.д.).

2-й рівень мобільної компоненти (рис. 1.5) утворює мережу мобільних базових станцій (наземна магістральна мережа). Вона призначена для поліпшення якості зв'язку, перш за все, підвищення продуктивності мобільної компоненти і надання заданої якості обслуговування абонентів (QoS).

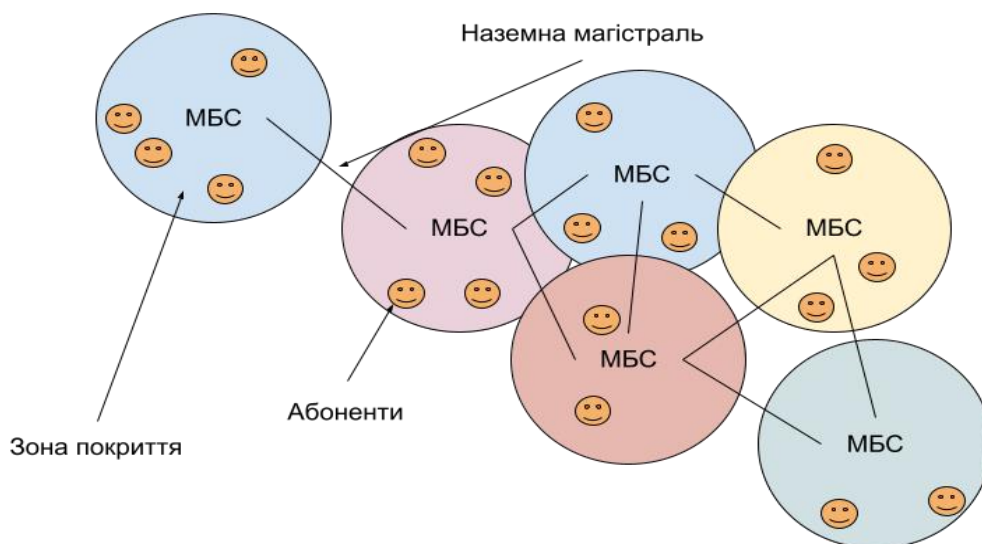


Рис. 1.5. Мережа мобільних базових станцій (радіомережа із самоорганізацією 2-го рівня)

Кожна мобільна базова станція являє собою вузол (шлюз) комутації, який за допомогою наявних засобів радіопередачі:

1. створює мережу МБС по принципам радіомережі із самоорганізацією (а не за принципами стільникової або транкінгової мережі!) з використанням спрямованих антен. Для функціонування мережі МБС в режимі самоорганізації необхідно вирішувати завдання динамічного формування (перестроювання) топології мережі, маршрутизації, розподілу радіо ресурсів (найбільш доцільно використовувати детерміновані методи розподілу радіо ресурсів) і т.п. [2-6]. Також для збільшення продуктивності і безпеки від прослуховування мережі МБС можливе використання ресурсів оптичного діапазону - лазерних систем передачі;

2. забезпечує доступ мобільних абонентів до використання ресурсів мереж мобільних базових станцій і безпілотних літальних апаратів (БЛА);

Додатковою складовою мобільної компоненти можуть служити сенсорні мережі (0-рівень), які забезпечують прийом і передачу розвідувальної інформації про ворога і передачу її органам управління військами.

Сенсорні пристрої являють собою інтегровану платформу, яка об'єднує можливості сенсорів (зовнішніх датчиків, які реєструють сукупність фізичних параметрів - акустичних, вібраційних, радіаційних, хімічних, біологічних і т.п.) з мікрокомп'ютерами, з'єднаних в бездротову мережу. Принцип побудови - децентралізоване управління (для сенсорних мереж значної розмірності - ієрархічне) [12].

На рис. 1.6 наведено приклад функціонування наземних стаціонарних сенсорних мереж: виявлення сенсорами руху танка ворога, передача координатної інформації місцеположення танка (через сенсорну або іншу мережу) засобам ураження (наприклад, бойового вертольоту) і знищення танка.

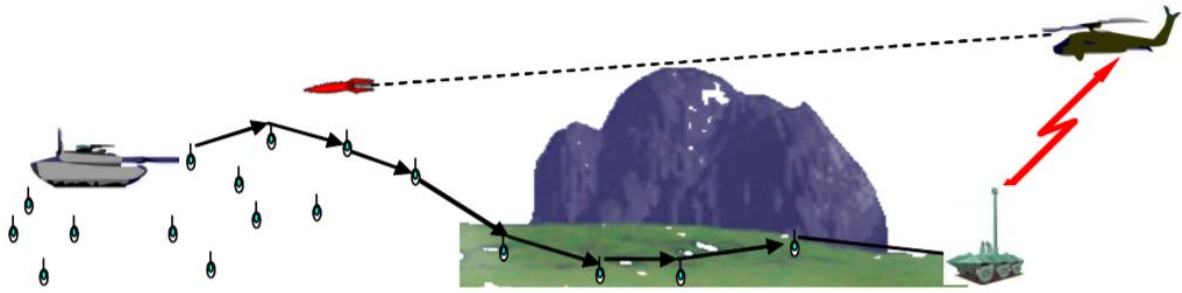


Рис. 1.6. Застосування наземної стаціонарної сенсорної мережі

Для зв'язку між географічно розділеними угрупованнями військ (зонами мережі) або підвищення надійності зв'язку між МБС і продуктивності мобільної компоненти створюється третій (верхній) рівень - повітряна, магістральна мережа, яка може бути реалізована на безпілотних літальних апаратах (літак, дирижабль) (рис. 1.7), а також супутниках. Пропозиції щодо створення мережі БЛА в масштабах всієї України можуть бути знайдені в [13].

Кожен БЛА оснащений двома типами радіозасобів з використанням спрямованих антен: перший - для зв'язку з МБС або виділеними абонентами першого (нульового) рівнів; другий - для обміну інформацією з сусідніми БЛА. Безпілотні літальні апарати об'єднані в мережу повітряних вузлів комутації повідомлень (пакетів) з реалізацією функцій маршрутизації: збір (розсилка) маршрутної інформації, її зберігання, обчислення маршрутів, передача пакетів за маршрутами двох типів. Перший тип маршруту обумовлює ретрансляцію трафіку в межах своєї зони обслуговування, другий - між різними ($m - n$) зонами: абонент_{*i*} – МБС_{*m*} – БЛА_{*m*} – ... – БЛА_{*n*} – МБС_{*n*} – абонент_{*n*}.

Переваги застосування мережі з БЛА полягають у наступному (рис. 1.6):

1. забезпечується зв'язність між географічно розділеними угрупованнями військ (зонами мобільної компоненти);
2. підвищується надійність зв'язку між МБС в межах однієї зони за

рахунок появи альтернативних незалежних маршрутів передачі;

3. підвищується продуктивність мережі за рахунок використання радіоканалів між БЛА з більшою пропускнуою здатністю в порівнянні з радіоканалом типу МБС-МБС, ефективності управління мобільним компонентом (зменшується об'єм службової інформації, що передається і знижується час її збору), багатократне скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах передачі інформації і т.д.

4. забезпечується задана якість обслуговування абонентів (QoS) за рахунок застосування детермінованих протоколів множинного доступу [14];

5. забезпечується дистанційний збір розвідувальної інформації або зняття інформації з датчиків сенсорних мереж.

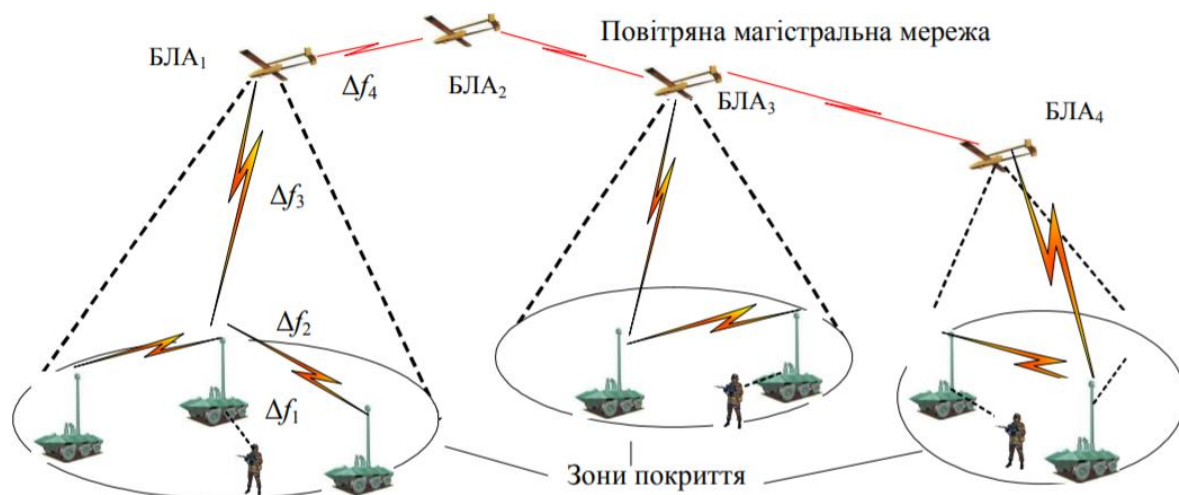


Рис. 1.7. Мережа на БЛА

Таким чином, система зв'язку тактичної ланки розвивається в напрямку застосування відкритої архітектури, впровадження новітніх телекомунікаційних технологій, які використовуються в комерційних системах зв'язку. Існуючі цивільні технології (фізичного і канального рівнів) бездротових мереж зв'язку являють собою основу для створення мобільних радіомереж тактичного рівня.

Нова архітектура мобільної компоненти систем військового зв'язку - трирівнева ієрархія неоднорідних систем, радіомережі із самоорганізацією (мобільні абоненти - мобільні базові станції - безпілотні літальні апарати) типу MANET. Реалізація кожного її рівня дозволить значно поліпшити якість функціонування системи зв'язку і параметри інформаційного обміну. Однак для її реалізації необхідно вирішення низки проблем наукового (розробка математичного та програмного забезпечення інтелектуальної децентралізованої системи управління і т.п.) і технологічного плану (побудова програмованих багатофункціональних багатодіапазонних радіозасобів).

Застосування запропонованої архітектури мобільної компоненти призведе до появи принципово нових форм (способів) ведення бойових дій, змінить форми і способи управління військами, а також дозволить значно збільшити бойову ефективність військ.

1.3.2. Mesh мережі

Бездротовий доступ останнім часом отримує все більшу популярність як в стільникових мережах зв'язку, так і в бездротових локальних мережах WLANs (Wireless Local Area Networks), які зазвичай асоціюються з сімейством стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi).

Дані технології (абсолютно різні за принципами побудови) призначені для забезпечення зв'язності між абонентами і можуть знайти застосування значної кількості додатків. Однак перетворення Wi-Fi в дієвий інструмент корпоративної комунікації і справді масову технологію обміну даними ставить перед розробниками серйозну проблему бесшовного міжмережевого роумінгу. Ця проблема вирішується в рамках mesh архітектури і саме з її впровадженням аналітики пов'язують черговий виток зростання бездротових мереж [15, 16].

Бездротові mesh мережі WMN (Wireless Mesh Networks) потенційно

виключають багато з перерахованих недоліків і при цьому забезпечують дешевий бездротовий доступ до Інтернет (провідної мережі) для фіксованих і / або мобільних абонентів (діючий протокол бездротових mesh мереж - IEEE 802.11s). На рис. 1.8 представлений типовий варіант побудови WMN, яка складається з бездротових маршрутизаторів (mesh-маршрутизаторів), шлюзів і абонентів. Для підключення до Інтернет досить одного шлюзу.

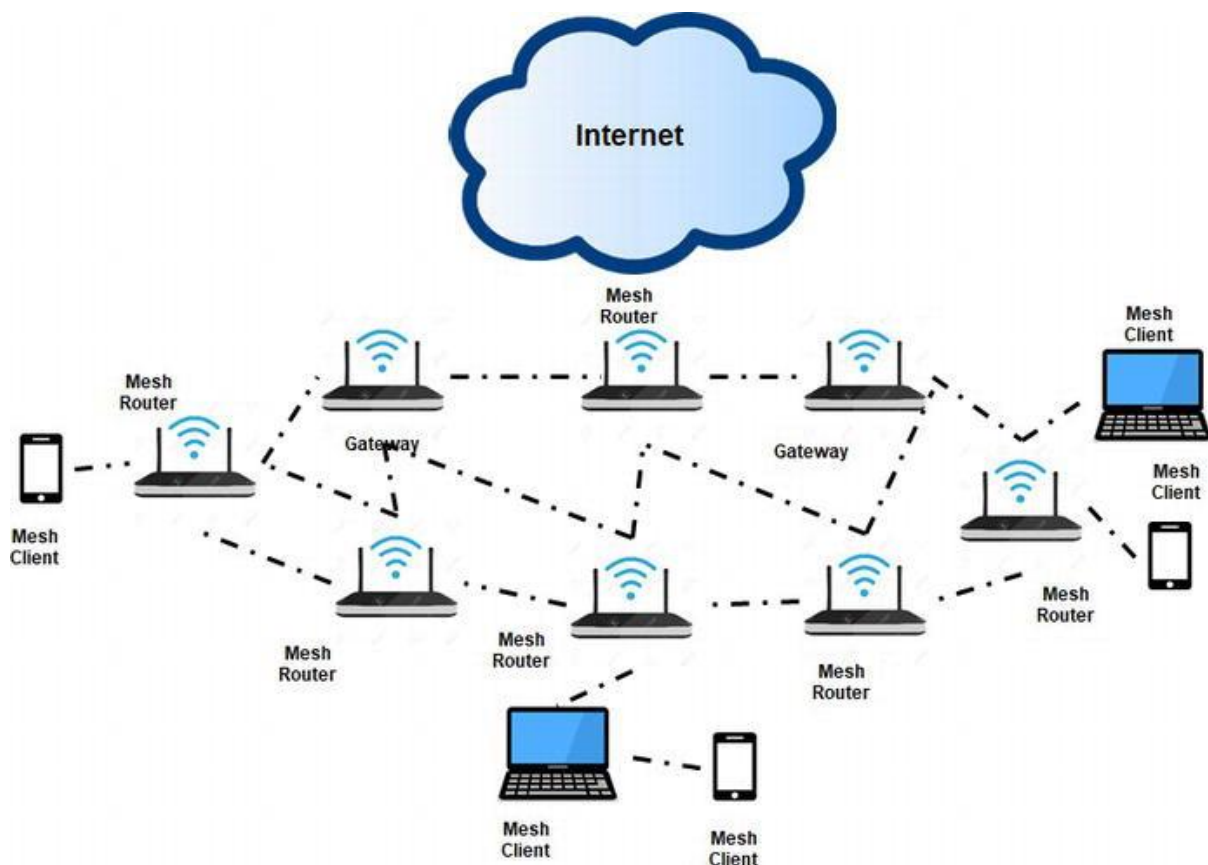


Рис.1.8 Варіант бездротової mesh мережі

Кожен абонент оснащений радіо-устаткуванням для зв'язку з mesh-маршрутизаторами, які утворюють бездротову магістраль mesh мережі і забезпечують динамічну маршрутизацію пакетів між собою. Mesh-маршрутизатори фактично є стаціонарними вузлами (зазвичай монтуються на видимих ділянках дахів будинків (рис. 1.9)).

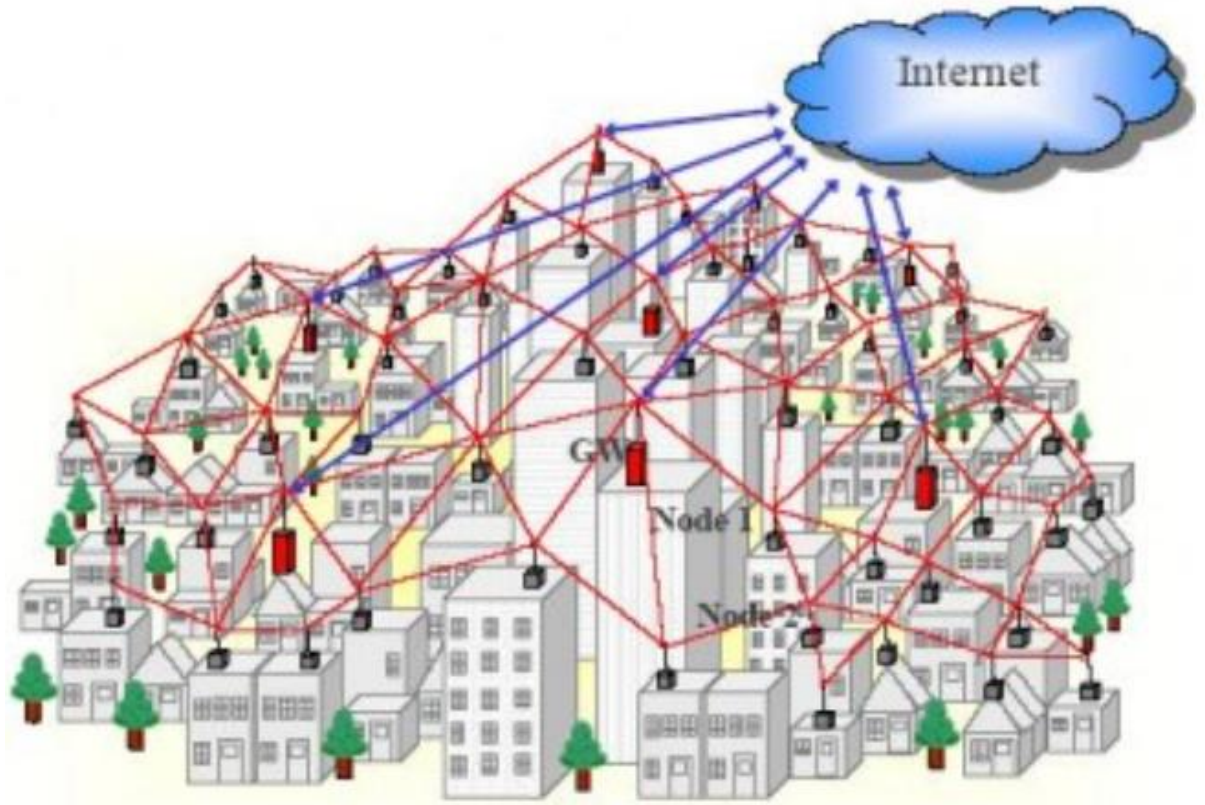


Рис.1.9 Приклад WMN

Обладнання mesh-маршрутизаторів відрізняється від обладнання абонентів наступними основними характеристиками: велика потужність передачі, наявність декількох приймально-передавальних пристроїв і антен, підтримка декількох бездротових протоколів, відсутність обмежень на споживану потужність, реалізація протоколів маршрутизації та ін. В загальному випадку архітектура WMN ієрархічна і представлена наступними елементами :

- верхній рівень - шлюзи (специфічні маршрутизатори), пов'язані з Інтернетом високошвидкісними дротовими каналами;
- середній рівень - магістральна мережа стаціонарних бездротових маршрутизаторів;
- нижчий рівень - мережа, яку утворюють стаціонарні або мобільні користувачі, пов'язані з бездротовим маршрутизатором (в загальному випадку абоненти також можуть виступати в ролі маршрутизаторів, тобто

можуть передати дані один через одного - фактично утворюючи мережу типу MANET - Mobile Ad Hoc Network).

Алгоритм обміну інформацією полягає в наступному. При необхідності передачі mesh-абонентом даних адресату (mesh-абоненту або шлюзу), що не перебуває з ним у безпосередній зоні радіозв'язку, пакет передається найближчому mesh-маршрутизатору. Далі пакет (згідно з прийнятим протоколом маршрутизації) передається по маршруту бездротової магістралі, поки не досягне mesh-маршрутизатора, що має радіозв'язок з адресатом, який і передасть пакет адресату.

Звичайним способом організації бездротових mesh мереж є використання в радіоканалах окремих стандартів (для усунення перешкод) між маршрутизаторами магістралі і каналами маршрутизатор-абонент. Наприклад, стандарт IEEE 802.11a може бути використаний для каналів магістралі, а стандарт IEEE 802.11b - для зв'язку між абонентом і маршрутизатором.

Відсутність додаткових вимог до WMN (за винятком маршрутизації) пояснює гнучкість і багатоваріантність їх побудови. Наприклад, доступ до Інтернет може бути проводимим або безпроводимим. Користувачі можуть входити в мережу по внутрішнім бездротовим каналам, які використовуються для зв'язності мобільних абонентів, або застосовувати інші технології (мережі Wi-Fi, стільникові, WiMax, MANET, сенсорні) і працювати з різними додатками.

Особливостями WMN (одні з них притаманні mesh мережам, інші розширюють поняття гібридних MANETs [15-17]) є наступні характеристики.

Бездротовість. WMN, з одного боку, обмежена в дальності передачі через загасання при поширенні радіохвиль, потенційно має високу величину помилок і втрат пакетів, а з іншого - забезпечує мобільність абонентів.

Багатострибковість (multihop). Звичайна бездротова мережа збільшує покриття мережі за рахунок підвищення потужності передачі або додавання додаткових точок доступу. На противагу цьому вузли WMN, використовуючи багатокрокову маршрутизацію, передають дані без збільшення радіусу передачі.

Надмірність. Бездротова магістраль формує mesh мережу. Це забезпечує додаткові канали (маршрути) між mesh-маршрутизаторами, mesh-шлюзами і mesh-абонентами. Відмова каналу або вузла не призводить до відмови в передачі повідомлення.

Мобільність. У загальному випадку mesh-маршрутизатори та mesh-шлюзи також можуть бути мобільними. В цьому випадку WMN фактично стає дворівневою мережею MANET, проблеми управління якої описані в [17]. На відміну від MANET mesh мережі мають певну ієрархічну архітектуру. Mesh - шлюзи і mesh - маршрутизатори формують квазістатичну магістраль, не обмежені в потужності передавачів і продуктивності процесорів, можуть оснащуватися декількома приймачами. Абонент, який не реалізує функції маршрутизації, може бути впроваджений в WMN без всяких обмежень (на противагу MANET, де всі вузли повинні виконувати функції маршрутизатора).

Переваги mesh мереж. Невисока вартість інвестицій. Технологія mesh мереж створює перспективи розгортання бездротового середовища, що не вимагає особливого планування архітектури. В результаті створення бездротової мережі стає дешевше в порівнянні з традиційними WLAN. Тому WMN викликають великий інтерес муніципалітетів та інших організацій, що мають обмежений бюджет.

Значне покриття користувачів. Завдяки багатострибковій маршрутизації не потрібна наявність прямої зв'язності між абонентом і базовою станцією.

Швидке розгортання і масштабованість. Новий абонент може бути

підключений до WMN за кілька хвилин замість місяців, необхідних для побудови нової кабельної мережі. Тому WMN знайдуть своє застосування на виставках, конференціях та інших заходах.

Живучість. WMN зазвичай використовує декілька шлюзів для підключення до Інтернет, маршрутизатори забезпечують децентралізовану побудову та підтримку маршрутів в залежності від ситуації на мережі. Особливість mesh мережі - відсутність центру управління, можливість самоорганізації і самоадаптації відповідно до мінливих параметрів середовища (автоматичне конфігурування та зміна налаштувань).

Висока пропускна здатність. Фізичні властивості бездротових каналів такі, що на більш коротких відстанях пропускна здатність мережі вище. Одним із способів підвищення пропускної здатності мережі є передача даних через кілька ретрансляторів, що знаходяться на малих відстанях. Тому WMN може забезпечити підвищення пропускної здатності мережі (при вимозі меншої потужності передавача і задоволенні при цьому всім законодавчим нормам, що обмежують максимальну потужність передавачів).

Просторове розділення. Такий поділ є ще однією перевагою WMN в порівнянні з одновузловими мережами (пристрої, спільно використовують одну точку доступу). У WMN безліч пристроїв можуть підключатися одночасно через різні вузли. Малі відстані передачі даних в WMN дозволяють зменшити вплив перешкод і здійснювати одночасну передачу просторово розділених потоків даних.

Інтелектуальність. Інтелектуальність інтегрована безпосередньо в WMN і забезпечує автоматизацію процесу адміністрування і оперативного управління мережею. Точка доступу при включенні автоматично виявляє інші точки доступу і "з'ясовує" свою роль в мережі. Це виключає необхідність ручного адміністрування мережі і грає важливу роль для оперативного розгортання обладнання. Як тільки мережа запускається в

експлуатацію, вона починає автоматично керувати своєю роботою.

Проблеми створення і розвитку WMN. Незважаючи на великий потенціал WMN, до сих пір залишається ряд проблем, що перешкоджають їх швидкому поширенню. Основні з них: функціональна сумісність; ефективність протоколів на кожному з рівнів еталонної моделі OSI; якість обслуговування передачі; управління мережею; безпека передачі.

Функціональна сумісність. Поширенню WMN сприяє її здатність взаємодії з існуючими мережевими стандартами і протоколами (Ethernet, VPN, VLAN, OSPF та ін.). Ця здатність дозволяє різним виробникам WMN взаємодіяти на каналному і мережевому рівнях OSI, включаючи протоколи IPv4 і IPv6. Мережа повинна об'єднувати безліч пристроїв з різними інтерфейсами бездротового зв'язку. Тому в даний час в корпорації "Intel" ведуться роботи по вирішенню цього завдання на рівні пристроїв - розробляються радіопередавальні системи, які можуть змінювати конфігурацію, що адаптуються до будь-якого середовища бездротового зв'язку. Такий підхід є значно дешевшим, ніж реалізація декількох бездротових інтерфейсів в кожному пристрої.

Фізичний рівень. На цьому рівні WMN повинна відповідати наступним вимогам: адаптація радіоканалу (мінімізації помилок за рахунок комбінації різних типів модуляції і способів кодування); регулюванню потужності передачі (з метою мінімізації перешкод, мінімізації затримки передачі і ін.); наявності декількох приймачів, використання спрямованих антен та ін. В перспективі розглядається застосування програмованих радіозасобів (soft radio), MIMO технологій, надширокосмугових сигналів (UWB) та ін.

Канальний рівень. У порівнянні з класичними бездротовими WLANs MAC-протоколи для WMN вимагають децентралізованого кооперативного функціонування вузлів на відстані, більшій ніж одна ретрансляція, і повинні враховувати мобільність абонентів і спрямованість трафіку

(абонент-шлюз). Використання випадкових протоколів доступу в WMN неефективно і тому перспективним є: використання гібридних схем тимчасового і кодового поділу каналів, декількох каналів замість одного (в одному маршрутизаторі кілька радіо-інтерфейсів), а також інтеграція в бездротові маршрутизатори різних протоколів (IEEE 802.11, IEEE 802.16, IEEE 802.15) та ін.

Мережевий рівень (маршрутизація). Основне завдання рівня - забезпечення передачі пакета від відправника до адресата за допомогою декількох ретрансляцій. В цьому відношенні WMN радикально відрізняються від технологій 3G, WLANs, WMANs, що використовують єдиний безпроводний канал і тому не вимагають мережевого рівня. У WMN ж (як і в MANET) вузли будують і підтримують маршрути для передачі пакетів. В якості основних вимог до методів маршрутизації можна віднести наступні [16, 18]: масштабованість, ефективність, надійність, адаптивність, забезпечення заданої якості обслуговування (QoS).

На сьогодні для MANET запропонована значна кількість методів маршрутизації [18]. Однак в MANET трафік може існувати між будь-якою парою вузлів і всі вузли мобільні, тоді коли в WMN трафік має спрямованість (абонент-шлюз); крім того, абоненти можуть бути як мобільними, так і стаціонарними. Очевидно, що ряд протоколів маршрутизації, запропонованих для MANET, з певними доопрацюваннями може бути використаний і в WMN [19]. Для максимізації продуктивності при передачі трафіку можуть застосовуватися різні метрики, що враховують смугу пропускання, рівень сигналу, його стабільність, затримку або інші параметри каналу (вузла).

Транспортний рівень. Спеціальні протоколи транспортного рівня поки не запропоновані для WMN. Однак значна кількість протоколів, запропонованих для MANET, можуть служити основою для створення

протоколу транспортного рівня, орієнтованого на WMN [20].

Управління мережею. Більшість з функцій управління мережею повинні бути реалізовані в WMN [1], наприклад моніторинг мережі, управління потужністю передачі та ін.

Якість обслуговування. Різні програми генерують потоки даних різної інтенсивності і мають різні вимоги до пропускної здатності [21]. Проблема - в класифікації і пріоритетності трафіку в вузлах (і в обсязі всієї мережі) для досягнення максимальної продуктивності і забезпечення максимальної зручності користувачів.

Безпека WMN. Безпека визначається наступними особливостями: децентралізованою мережевою архітектурою, вразливістю радіоканалу і динамічністю топології. Сервіси безпеки (таємність, легітимність, цілісність, контроль доступу, незаперечність) повинні враховувати особливості мереж із самоорганізацією і забезпечуватися тими чи іншими механізмами безпеки з метою захисту від певної множини атак [22, 23].

Таким чином, бездротові mesh мережі пропонують найбільш економічно вигідне і гнучке рішення бездротового зв'язку. Хоча технологія поки що перебуває в стадії розвитку, вона вже демонструє значний потенціал в області створення ефективних бездротових обчислювальних середовищ, що відповідають вимогам бізнесу, що володіють можливістю використання в домашніх умовах, в промисловості і серед постачальників послуг широкосмугового зв'язку.

Технологія успішно поєднується з іншими традиційними технологіями (3G, WLANs, WMANs). Основний її недолік - це відносна складність її комбінування з іншими бездротовими технологіями при поєднанні функцій хоста і маршрутизатора в кожному вузлі мережі. Однак наукові дослідження останніх років свідчать про швидке створення ефективних бездротових mesh мереж [24].

1.3.3. Сенсорні мережі

В останні роки в усьому світі все більш пильну увагу привертають до себе "бездротові сенсорні мережі" ("Wireless Sensor Networks", далі - просто сенсорні мережі). Основною їх відмінністю від класичних радіомереж є використання в якості об'єктів мережі великого числа надмініатюрних і дешевих пристроїв. Даний підхід до формування мережі дозволяє адаптувати сенсорні мережі до вирішення надзвичайно широкого спектра завдань. Зокрема, одним з основних застосувань сенсорних мереж є створення різноманітних систем моніторингу і контролю. Слід очікувати, що в недалекому майбутньому сенсорні мережі займуть свою досить велику нішу серед наявних телекомунікаційних технологій, які використовують бездротовий радіозв'язок.

Сенсорні мережі складаються з малогабаритних сенсорних вузлів з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних [12]. Основними елементами сенсорних вузлів є (рис.1.10): датчики контролю фізичних параметрів зовнішнього середовища, обчислювальна платформа, батареї, GPRS модуль, GPS модуль, радіомодуль.



Рис.1.10 Сенсорний вузол

У конструктивному плані основною відмінністю сенсорних мереж від класичних телекомунікаційних радіомереж є використання в якості об'єктів мережі великого числа надмініатюрних і дешевих пристроїв. Кожен пристрій може містити різні датчики фізичних параметрів навколишнього середовища (освітленість, температура, вологість, тиск, датчики вібрацій та ін.), А також засоби для первинної обробки та зберігання отриманих даних. Кількість об'єктів в такій мережі теоретично визначається тільки областю застосування і бюджетом, а завдяки низькій ціні окремих пристроїв (порядку декількох доларів і нижче) може бути дуже велике (близько декількох тисяч і вище). В експлуатаційному плані основними відмінностями є, по-перше, специфічні системні вимоги (робота при різних зовнішніх умовах, можливість випадкових переміщень окремих пристроїв і динамічних змін в топології мережі) і, по-друге, жорсткі реалізаційні обмеження (по енергоспоживанню, обчислювальній потужності вбудованого процесора, обсягу вбудованої пам'яті і ін.). При цьому обмежені можливості окремих об'єктів мережі призначені в першу чергу для передачі невеликих обсягів інформації з низькою швидкістю.

З урахуванням потреби в радіозв'язку, орієнтованої на пристрої з низьким енергоспоживанням в 2003 р, організацією IEEE був прийнятий стандарт IEEE 802.15.4, в якому визначені фізичний і канальний рівні стека мережевих протоколів в бездротових мережах, що відповідають даним потребам. У цьому документі на фізичному рівні визначені три діапазони частот: 868 МГц, 910 МГц і 2,4 ГГц. В даному діапазоні визначено 16 каналів шириною 5 МГц із такими частотами:

$$F_c = 2405 + 5(k - l) \text{ МГц}, k = 1, \dots, 16$$

Швидкість передачі в кожному каналі становить 250 Кб/с. Крім того, на фізичному рівні визначені можливості вмикання / вимикання приймача, оцінка рівня перешкод в каналі, прийом / передача даних, оцінка рівня сигналу. На канальному рівні знайдені механізми доступу до загального

середовища передачі даних, наведені загальні рекомендації до побудови топології мережі. Залежно від вимог предметної області така мережа може працювати в топологіях типу "point-to-point" або "зірка", причому топологія типу "зірка" в повній мірі відповідає описаним вище сценарієм використання бездротової мережі.

Організація вищих рівнів в документі IEEE 802.15.4 не розглядається, тому на даний момент є кілька варіантів організації повного стека мережевих протоколів, заснованих на цьому стандарті, зокрема, WirelessHART, ISA100, ZigBee, з яких найбільш популярний ZigBee, який додає до IEEE 802.15.4 мережевий рівень і рівень додатків. На мережевому рівні ZigBee визначені механізми маршрутизації та управління мережею (формування логічної топології мережі).



Рис.1.11 Класифікація сенсорних мереж

Стационарні, рухомі і гібридні сенсорні мережі. Можна використовувати стационарні сенсорні вузли і рухомі сенсори-роботи для збору інформації серед сенсорних вузлів. Мобільні сенсорні мережі відносяться до класу MANET, а стационарні - до класу бездротових mesh мереж (Wireless Mesh Network).

Децентралізовані, ієрархічні і гібридні сенсорні мережі. Ієрархічна організація мережі допускає розбивку мережі на зони (кластери) з

виділенням в кожній зоні головних і простих сенсорів-вузлів, а також сенсорів-шлюзів (для зв'язку між зонами). Вона є комбінацією централізованого (в зонах) і децентралізованого (між головними вузлами) способів управління.

Наземні, підземні, морські, повітряні мережі. Прикладом таких мереж може служити розгорнута на дні океану ще в 60-ті роки минулого століття військовим агентством DARPA підводна сенсорна мережа стеження за радянськими підводними човнами.

Акустичні, оптичні, сейсмічні, хімічні та інші подібні мережі. Залежно від середовища моніторингу в сенсорах використовують датчики, які реєструють певні фізичні параметри (наприклад, рівень радіації).

Переваги технологій бездротових сенсорних мереж можуть бути ефективно використані для вирішення різних прикладних задач, пов'язаних з розподіленим збором, аналізом і передачею інформації.

1. Автоматизація процесу збору даних усередині приміщень: моніторинг температури, витрати повітря, присутності людей і управління обладнанням для підтримки мікроклімату; управління освітленням; управління енергопостачанням; збір свідчень квартирних лічильників газу, води, електроенергії і т.д; охоронно-пожежна сигналізація; моніторинг стану несучих конструкцій будівель і споруд.

2. Дистанційний контроль і діагностика промислового обладнання; технічне обслуговування обладнання по поточному стану (прогнозування запасу надійності); моніторинг виробничих процесів; телеметрія для досліджень і ін.

3. Моніторинг навколишнього середовища (забруднення, сільське господарство та ін.).

4. Охорона здоров'я: моніторинг фізіологічного стану пацієнтів, контроль місця розташування і оповіщення медичного персоналу.

5. Безпека і оборона: контроль над переміщенням людей та техніки; контроль периметра і спостереження; допомога в проведенні рятувальних операцій; моніторинг майна і цінностей; охоронно-пожежна сигналізація, засоби розвідки. Архітектура тактичної сенсорної мережі приведена на рис. 1.12. Основні елементи (характеристики - в табл. 1.4) [25]: сенсорні вузли, шлюз, бездротовий міст, контролер.

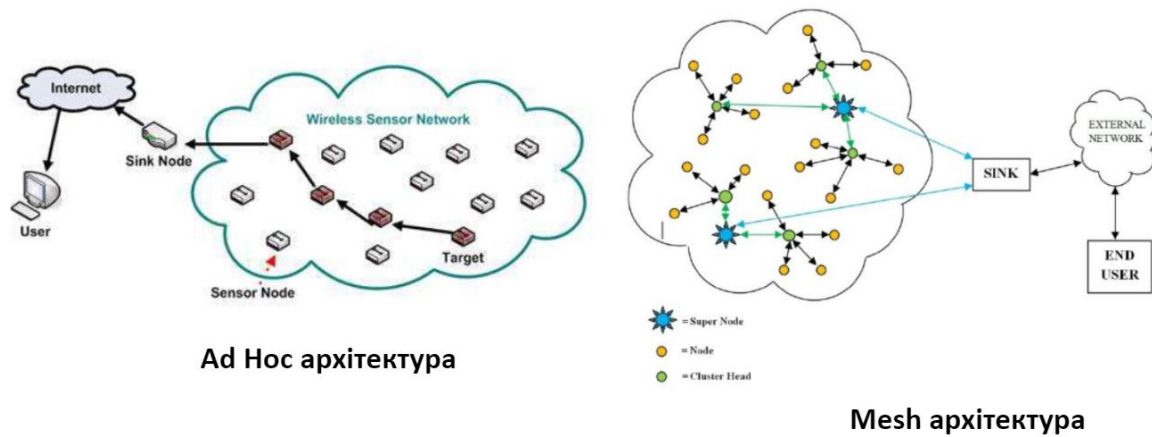


Рис. 1.12. Архітектура тактичної сенсорної мережі

Таблиця.1.4

Характеристика	Сенсор	Тактичний шлюз	Беспроводовий міст	Контролер мережі
Тип мережі (протоколи)	Ad Hoc mesh	Ad Hoc mesh	WIFI або UWB	Ad Hoc mesh Mil-STD 188-220
Швидкість передачі	до 100 кб/с	до 300 кб/с	до 300 кб/с	> 100 кб.с
Наявність GPS	+	+	+	+
Безпека	256 AES-шифрування	256 AES-шифрування	256 AES-шифрування	256 AES-шифрування

Продовження таблиці 1.4

Типи сенсорів	Інфрачервоний, акустичний, температурний, вібраційний, магнітометр	-	-	-
Час роботи	30-45 діб	60-120 діб	60-120 діб	60-120 діб
Тип живлення	тип АА			тип АА
Дальність передачі	300 м при прямій видимості	0.5-0.6 км	1-7 км в залежності від обладнання	до 300 м
Розмір	6.35x15 см	20x10x15 см	20x10x15 см	7x10x3 см
Вага	450 гр	1.8 кг	1.8 кг	540 гр
Опції			Підтримка сотових і радіотелефонів	

Сенсорні вузли тактичних мереж повинні швидко адаптуватися до частих змін топології мережі, трафіку і ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. В таких умовах забезпечити інформаційний обмін із заданою якістю неможливо без ефективної системи управління тактичною сенсорною мережею [25].

1.4 Переваги та перспективи радіомереж із самоорганізацією

Таблиця 1.5

Характеристика	Стільникові мережі	Транкінгові мережі	Мережі із самоорганізацією
Архітектура	Фіксовані зони обслуговування, стаціонарні базові станції		Відсутність фіксованої інфраструктури, кожен вузол є ретранслятором (маршрутизатором)
	Використання стаціонарної мережі загального користування	Використання фіксованої мережі для з'єднання базових станцій	
Тип топології	Статична		Випадкова, високодинамічна
Час розгортання	Дуже великий	Значний	Швидке розгортання, самоорганізація мережі
	Необхідне проектування	Необхідне планування	
Тип управління	Централізований (окрема мережа управління)		Децентралізований
Мобільність	Мобільні тільки абоненти в межах зон обслуговування		Мобільні всі вузли
Живучість	Дуже низька		Дуже висока
Захищеність даних	Низька		Висока
Швидкість передачі	Сотні кбіт/с - одиниці мбіт/с		1-54 мбіт/с

Щоб зрозуміти місце радіомереж із самоорганізацією в ряду інших технологій, розглянемо технології бездротового зв'язку, включаючи сучасні системи стільникового зв'язку, які в значній мірі спираються на

мережеву інфраструктуру: покриття забезпечується базовими станціями, управління ресурсами радіопередачі здійснюється централізовано і послуги інтегровані в систему.

Вже зараз можна навести приклади використання бездротових локальних та міських мереж, що ґрунтуються на використанні протоколів IEEE 802.11, HiperLAN2, Bluetooth та ін. Подальший розвиток бездротових технологій передбачає введення мережі MANET як складової мереж зв'язку четвертого покоління 4G - так звані стільникові/самоорганізовані (гібридні) мережі (рис. 1.13).

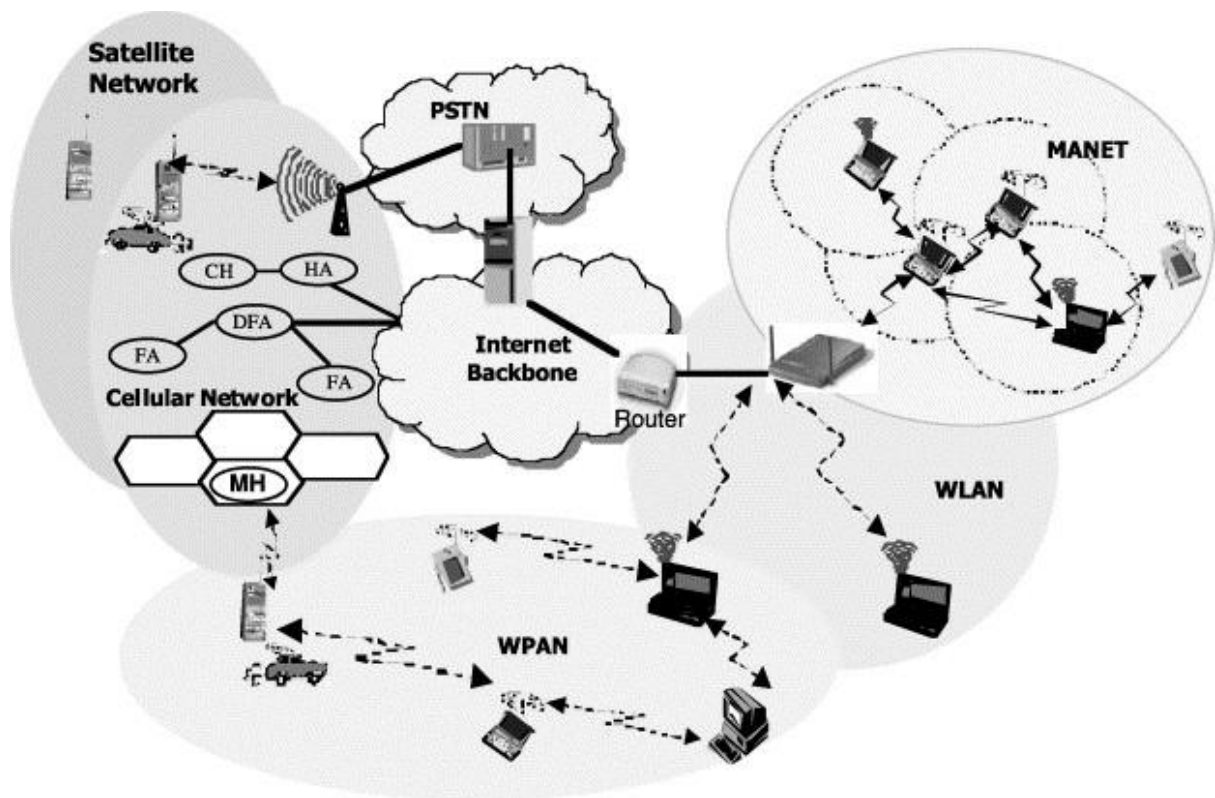


Рис. 1.13. 4G мережі

Висновки

Для ефективної роботи радіомережі із самоорганізацією мережеві вузли повинні швидко адаптуватися до частих змін топології і ефективно використовувати обмежені мережеві ресурси. У таких умовах забезпечити інформаційний обмін із заданою якістю неможливо без ефективної системи керування мережею.

Найважчими проблемами, що стають на шляху до побудови ефективної системи керування є: обмежена пропускна здатність каналів зв'язку мережі, обмежена ємність встановлених носіїв живлення в БПЛА, що призводить до необхідності обмежувати обчислювальну потужність плат керування та радіопередавачів.

Одним із шляхів вирішення цих питань є використання ефективного методу маршрутизації в радіомережі із самоорганізацією, який буде максимально ефективно використовувати ресурси мережі та вузла для підтримки високого відношення доставлених пакетів (Packet Delivery Ratio), низького рівня затримки пакетів (Packet Delay) та забезпечення необхідного показника QoS (Quality of Service) для заданої мережі.

Велике навантаження на процес маршрутизації в мережах FANET викликає головна їх особливість - висока частота змін топології мережі. Це призводить до постійної необхідності моніторингу доступності вузлів мережі для передачі пакету та побудови маршрутів до кінцевих вузлів призначення. Це суттєво збільшує навантаження на вузли та мережу, що призводить до високого споживання ємності елементів живлення, та займає значну частину пропускної здатності каналів зв'язку.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ

2.1 Аналіз методів маршрутизації в стаціонарних мережах

Під методом маршрутизації (ММ) розумітимемо сукупність правил (процедур), що визначають процедуру встановлення та підтримки маршрутів передачі між відправником і адресатом у мережах зв'язку та забезпечують ефективне використання мережевих ресурсів при заданій якості обслуговування користувачів [99]. Ця послідовність дій може враховувати досяжність окремих вузлів (елементів мережі), частоту помилок при передачі даних, довжини черг пакетів до каналів, що виходять, оцінки затримок пакетів на різних маршрутах і т.д. Відповідні рішення можуть прийматись під час встановлення кожного логічного з'єднання між відправником і адресатом даних (режим віртуальних каналів) або незалежно для кожного пакету (дейтаграмний режим).

Метою маршрутизації є знаходження такого шляху (або сукупності шляхів) між джерелом та адресатом, який забезпечить ефективне використання мережевих ресурсів та задану якість обслуговування користувачів.

Все різноманіття методів маршрутизації можна розділити за такими ознаками [27-38]: використання маршрутних таблиць; частота ухвалення рішення; спосіб ухвалення рішення; місце використання методу у мережі; необхідна інформація для ухвалення рішень.

Перш за все, необхідно зазначити, що більшість методів маршрутизації використовують таблиці маршрутизації для зберігання інформації про зміни конфігурації мережі. Але існують і такі способи передачі пакетів у мережі, які не вимагають наявності таблиць маршрутизації у мережі, тобто ніяких спроб запам'ятати маршрут не

робиться. Натомість вузли відстежують лише сам факт проходження через них окремих пакетів і приймають рішення про те, чи слід передавати їх далі (зазвичай на підставі того, проходив раніше пакет чи ні).

Адаптивні протоколи маршрутизації, що застосовуються у стаціонарних мережах, поділяються на дві групи:

a. дистанційно-векторні алгоритми DVA (Distance Vector Algorithms) — кожен маршрутизатор періодично та широкомовно розсилає сусіднім маршрутизаторам вектор, компонентами якого є відстані від даного маршрутизатора до всіх відомих маршрутизаторів (мереж). Ці алгоритми добре працюють лише у невеликих мережах. У великих мережах вони заповнюють мережу інтенсивним службовим трафіком, до того ж зміни конфігурації не завжди коректно можуть відпрацьовуватися алгоритмом цього типу, оскільки маршрутизатори не мають точного уявлення про топологію зв'язків у мережі, а мають лише узагальнену інформацію — вектор дистанцій, наприклад RIP (Routing) Information Protocol);

b. алгоритми стану зв'язків LSA (Link State Algorithms), які забезпечують кожен маршрутизатор інформацією, достатньою для побудови точного графа зв'язків мережі шляхом обміну короткими HELLO-пакетами зі своїми найближчими сусідами (методом лавинної розсилки). На відміну від протоколів DVA, оголошення про стан зв'язків протоколів LSA не повторюються періодично, а передаються тільки в тому випадку, коли за допомогою HELLO повідомлень було встановлено зміну будь-якого зв'язку (мережевої топології). В результаті обсяг службового трафіку при використанні протоколів LSA (наприклад, OSPF (Open Shortest Path First)) набагато менший, ніж при використанні протоколів DVA.

Залежно від способу прийняття рішень адаптивні ММ можна класифікувати як централізовані, розподілені та ієрархічні:

При централізованих адаптивних методах усі вказівки про зміну маршрутів розробляються центром управління мережею (ЦУС), що у деякому вузлі мережі (окремому маршрутизаторі), куди передається інформація про стан мережі. Потім цей вузол розсилає маршрутні таблиці по мережі, щоб кожен маршрутизатор отримав власну таблицю і надалі самостійно приймав рішення пошуку маршрутів для передачі інформації.

При розподілених адаптивних методах вибір маршруту у кожному вузлі проводиться самостійно виходячи з даних, одержаних за протоколом маршрутизації з інших маршрутизаторів мережі

Ієрархічні адаптивні методи розробляються в основному для великомасштабних мереж із великою кількістю вузлів. При цьому мережа ділиться на регіони, у кожному з яких є центр вимірювань та управління. Центр збирає інформацію про стан свого регіону та обмінюється цією інформацією з усіма регіональними центрами, які виробляють вказівки про зміну маршрутів та передають їх у вузли своїх регіонів.

Досвід показав, що централізовані методи ефективніші у глобальному сенсі, оскільки вибір маршрутів у кожному вузлі послідовно ґрунтується на стані всієї мережі. Методи розподіленої маршрутизації ефективні переважно у локальних ділянках; Рішення, що приймаються в окремих вузлах, часто виявляються неузгодженими, виникає зациклення пакетів. З іншого боку, ці методи швидко реагують на зміну потоків даних і ресурсів у локальних ділянках мережі.

Мережа Інтернет, крім організаційної структури, що визначає розподіл глобальної мережі на мережі різноманітних постачальників послуг, складається також із автономних систем — це сукупність мереж під єдиним адміністративним управлінням, що забезпечує загальну для всіх маршрутизаторів (що належать до певної автономної системи) політику маршрутизації. Автономні системи зв'язуються за допомогою зовнішніх шлюзів (маршрутизаторів), які використовують деякий

протокол маршрутизації, причому лише один – на відміну від маршрутизаторів усередині автономної системи. Тому залежно від місця роботи протоколів маршрутизації мережі розрізняють зовнішні і внутрішні шлюзові протоколи маршрутизації.

Зовнішні шлюзові протоколи відповідають за вибір маршруту між автономними системами. Як адреса наступного маршрутизатора вказується адреса точка входу до сусідньої автономної системи.

Основним зовнішнім шлюзовим протоколом у мережі Інтернет на сьогоднішній день є BGPv4 (Border Gateway Protocol), який прийшов на зміну протоколу EGP (Exterior Gateway Protocol) для усунення ефекту зациклювання маршрутів. Перевага протоколу BGPv4 полягає в успішній роботі при будь-якій топології зв'язків між автономними системами, що відповідає нинішньому стану Інтернету. Однак для взаємодії маршрутизаторів за протоколом BGPv4 необхідно конфігурувати їх адміністратором в ручному режимі.

Протокол ICMP (Internet Control Message Protocol) використовується в мережі Інтернет як допоміжний для оповіщення відправника про “нещасні випадки”, що відбулися з його пакетом у процесі передачі, а також для моніторингу мережі (утиліти ping та tracer).

Внутрішні шлюзові протоколи відповідають за маршрут усередині автономної системи. У випадку транзитної автономної системи ці протоколи вказують на точну послідовність маршрутизаторів від точки входу в автономну систему до точки виходу з неї.

Протокол RIP (Route Information Protocol) є внутрішнім протоколом маршрутизації дистанційно-векторного типу, який використовує для пошуку найкоротшого шляху алгоритм Веллмана-Форда. Для вимірювання відстані до мережі стандарти протоколу RIP допускають різні види метрик: значення пропускної спроможності, час затримки, надійність мереж, кількість ретрансляцій, і навіть комбінації цих метрик.

Перевага протоколу RIP полягає у його простоті, але це призводить до ускладнень у роботі протоколу у разі втрати якогось маршруту. Це пов'язано з тим, що у форматі повідомлення протоколу RIP немає поля, що вказує на те, що шляху до цієї мережі більше не існує. Ще один недолік протоколу RIP – зациклювання маршрутів.

Протокол OSPF (Open Shortest Path First) побудований на базі алгоритму стану зв'язків та працює у два етапи. У першому етапі кожен маршрутизатор будує граф зв'язків мережі, у якому вершинами графа є маршрутизатори, а ребрами - інтерфейси маршрутизаторів. Другий етап полягає у знаходженні оптимальних маршрутів за допомогою отриманого графа (за допомогою алгоритму Діjkстри). Основним недоліком протоколу OSPF є значне зростання обчислювальної складності зі збільшенням розмірності мережі.

Залежно від інформації, що використовується для ухвалення рішення, адаптивні методи маршрутизації поділяються на ізольовані та кооперовані.

Ізольовані методи діють у кожному вузлі незалежно та використовують лише інформацію про стан свого власного вузла та його вихідних каналів. При кооперованих методах вузли обмінюються службовою інформацією для вибору маршрутів передачі. Вони забезпечують швидку адаптацію, надійність і гнучкість маршрутизації, але вимагають передачу службової інформації між вузлами мережі та пам'ять для збереження цієї інформації, тобто використовують частину ресурсу мережі. Зі збільшенням розмірності мережі витрати її ресурсів значно зростають.

Існують різні варіанти обміну службовою інформацією при кооперованій маршрутизації. Наприклад, вузли можуть повідомляти про довжини черг пакетів на канали, що виходять векторами оцінених мінімальних затримок пакетів до всіх вузлів мережі. Такий обмін може

бути періодичним або аперіодичним. При будь-якій кооперативній маршрутизації виконуються такі чотири функції:

1. стан кожного окремого вузла повідомляється сусіднім вузлам чи центру маршрутизації мережі;
2. виходячи з цих повідомлень формується загальний стан мережі;
3. проводиться вибір оптимальних маршрутів з урахуванням загального стану мережі;
4. коригуються маршрутні таблиці у вузлах мережі.

У цілому нині адаптивні ММ є наближенням, часто досить грубим, до оптимальної маршрутизації за критерієм мінімального середнього часу доставки пакетів у мережі. Причина в тому, що не враховується вплив поточних дій на стан мережі в майбутньому. Як правило, переважується основний (найкращий маршрут) і недостатньо використовуються альтернативні (обхідні) маршрути.

При побудові методів маршрутизації зазвичай прагнуть виконати такі основні вимоги [30-34]: мінімальний середній час доставки пакета в мережі, адаптація до можливих змін навантаження в мережі на маршрутах від відправника до адресата, швидка реакція на зміни топології мережі, перешкодження зацикленню пакетів, достатня простота, мінімальні апаратні та програмні витрати для своєї реалізації.

Теоретично ідеальним є метод динамічної маршрутизації, що базується на глобальному обліку стану мережі. Однак зростання швидкості адаптації методу призводить до збільшення завантаженості каналів передачі службовою інформацією. Тому практично у мережах передачі використовують адаптивні методи маршрутизації. Адаптивна маршрутизація повинна задовольняти вимоги адаптації до коливань навантаження та змін структури мережі, забезпечувати відсутність циклів у маршруті та здійснення обходів навколо зон перевантаження мережі. Вона включає такі функції (рис. 2.1): контроль стану мережі; збір

службової інформації про стан мережі в точці прийняття рішення; зберігання маршрутів; обчислення маршрутів; ретрансляцію пакетів [32, 34, 38].

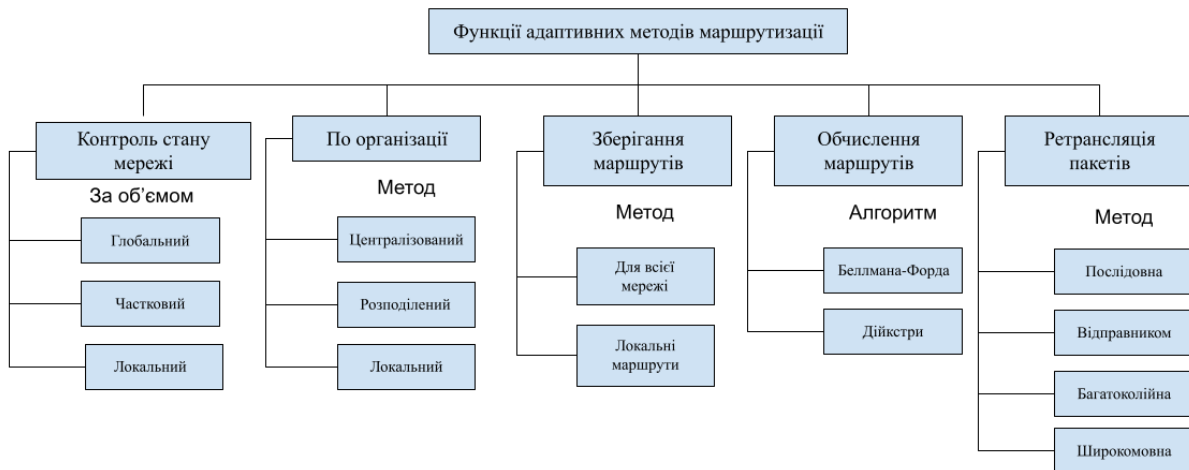


Рис. 2.1. Функції адаптивних методів маршрутизації

Контроль стану мережі. Змінними, що відображають стан мережі та використовуються для обчислення маршрутів, є: топологічна зв'язність, структура трафіку, затримка, якість каналів. Потрібно розрізнити локальний, глобальний і частковий стан. Щоб визначити локальну зв'язність, кожен вузол повинен контролювати стан суміжних каналів та (або) вузлів, відстежуючи трафік у каналі або (за відсутності трафіку) періодично опитувати сусідів. Навантаження локального трафіку контролюється за допомогою вимірювання відповідних параметрів, які називаються метриками. Метрикою може бути або пропускна здатність каналу, його завантаження на даний момент (середня або миттєва довжина черг), або затримка інформації при її проходженні цим каналом і т.д.

Багато протоколів маршрутизації (наприклад, IGRP) передбачають широкий діапазон значень метрик, що дозволяє проводити їх точне налаштування у великих мережах зі змінною продуктивністю та топологією. Замість простої метрики маршруту між вузлами i і j ці

протоколи використовують узагальнену метрику C_{ij} , яка є більш точної оцінкою маршруту:

$$C_{ij} = r \left(\left(\frac{k_1}{B_e} \right) + (k_2 t_3) \right),$$

де r - надійність (відсоток інформації, що успішно передана наступному вузлу); k_1, k_2 - константи, які по суті є ваговими коефіцієнтами пропускної спроможності та затримки; B_e - ефективна пропускна t_3 - час затримки.

Маршрут, що має меншу узагальнену метрику, буде найкращим. Якщо до одного одержувача є кілька маршрутів, у протоколі IGRP реалізовано можливість передачі трафіку по всіх або кількох маршрутах (багатомаршрутна передача). Наприклад, якщо один маршрут має узагальнену метрику 1, а інший — 3, через маршрут з метрикою 1 буде передано втричі більше даних. Проте використовуються лише маршрути, узагальнені метрики яких знаходяться у певному діапазоні.

Глобальний стан, що визначається інформацією про зв'язність та структуру трафіку всієї мережі, може бути оцінено за допомогою збору та аналізу локальної інформації, що надходить з усіх вузлів мережі. Частковий стан (стосовно заданого вузла) знаходиться на деякому проміжному рівні між глобальним та локальним станами. Він є станом мережі з точки зору даного вузла і включає всі елементи, необхідні для прийняття маршрутних рішень в цьому вузлі.

Існує тісний зв'язок між методами визначення стану мережі та класами методів маршрутизації. Так, ізольована стратегія маршрутизації заснована на локальній інформації про стан мережі, та розподілена на часткову інформацію про стан мережі, а централізована вимагає визначення локальної інформації у всіх вузлах та глобальної інформації про стан мережі в ЦУС. На основі якісного аналізу методів маршрутизації можна стверджувати, що глобальна інформація запізнюється більше (або менш актуальна по відношенню до реальної ситуації на мережі) та

створює більший додатковий службовий графік. Однак ця інформація має велику глобальність з погляду реального стану мережі загалом. Тому ймовірність утворення “петель” зводиться до мінімуму, і методи, що використовують глобальну інформацію про стан мережі, мають хорошу пристосованість (реакцію) до перевантажень мережі та стохастичну зміну структури мережі.

Збір інформації про стан мережі (розсилання маршрутної інформації). Результати вимірювань стану мережі можуть оброблятися локально, або передаватися на центр збору для подальшої обробки. У разі централізованої маршрутизації результати локальних вимірювань періодично повідомляються в ЦУС та узагальнюються для отримання глобальної інформації про стан мережі. При розподіленій маршрутизації результати локальних вимірювань комбінуються з інформацією, одержаною із сусідніх вузлів, і використовуються для коригування часткової інформації про стан мережі (для цього вузла); далі часткова інформація передається сусіднім вузлам. Ця інформація може передаватися вузлам синхронно або асинхронно, періодично або лише у разі її зміни (розсилка подій). У разі ізольованої стратегії маршрутизації результати вимірювань обробляються та використовуються локально (між вузлами немає обміну інформацією про стан).

Зберігання маршрутів. Існує кілька можливостей зберігання маршрутної інформації у вузлах. Найбільш загальне рішення полягає в тому, щоб у вузлі i ($i = 1, \dots, N$) зберігати матрицю розмірності $N * N_i$ (де N — загальна кількість вузлів; N_i — число сусідів вузла i), записи якої є частками, що направляється даному адресату сумарного трафіку, який має бути розподілений різними сусідніми вузлами (багатошляхова маршрутизація).

Ще один спосіб зберігання маршрутної інформації у вузлах полягає в тому, що вузол i ($i = 1, \dots, N$) зберігає всю матрицю зв'язків між

вузлами, але це вимагає $O(N^2)$ пам'яті. Зате при використанні такої матриці можна вирахувати і найкоротші шляхи, а не лише їх довжини.

Маршрутні таблиці або обчислюються локально (розподілена маршрутизація), або управляються централізовано (централізована маршрутизація).

Обчислення маршрутів. Як правило, вибір маршруту виконується за критерієм шляху мінімальної вартості (найкоротшого шляху) до адресата на основі інформації про стан мережі, доступної даному вузлу. При використанні ізольованої стратегії кожен вузол містить інформацію про стан своїх власних черг. Він також зберігає попередньо обчислений список кращих для даного адресата вихідних ліній (що упорядковані за пріоритетом). Стратегія полягає в маршрутизації пакетів найбільш пріоритетним каналом до тих пір, поки довжина черги не почне перевищувати заданого порогового значення. Далі використовується канал другого пріоритету і т.д. У розподіленій стратегії вузли вибирають найкоротші шляхи до кожного адресата на основі наявної в них інформації:

Кожен вузол мережі має часткову інформацію про стан мережі. У цьому випадку кожен вузол зберігає для кожного з N вузлів мережі число, яке є значенням ціни відомих найкоротших шляхів до цього вузла. Обмін цією інформацією дозволяє вузлам ітеративно обчислювати шляхи мінімальної ціни всім вузлам мережі, використовуючи метод Беллмана—Форда (у мережі Інтернет протоколи маршрутизації RIP, IGRP [27-29]);

Кожен вузол мережі має у своєму розпорядженні глобальну інформацію про стан мережі. У цьому випадку кожен вузол передає всім іншим вузлам мережі список ліній і їх вартість. Використовуючи цю інформацію, кожен вузол може виконати будь-який централізований метод пошуку найкоротшого шляху. Так, наприклад, працює мережа

Інтернет (протокол маршрутизації OSPF [27, 29]), в якому найкоротший шлях обчислюється методом Дійкстри.

При централізованій стратегії ЦУС володіє глобальною інформацією про стан мережі та періодично обчислює найкращі маршрути між усіма парами вузлів. При цьому у вузлах не потрібно жодних обчислень.

Ретрансляція пакетів. Ретрансляція пакетів - це процес, що відбувається в кожному проміжному вузлі і включає аналіз заголовка кожного вхідного пакета, опитування маршрутної таблиці, переміщення пакета у відповідну чергу і його передача. Потрібно розрізняти механізми передачі для віртуальних каналів та дейтаграм. У режимі віртуального каналу відправник та адресат встановлюють віртуальний канал і маршрут між ними фіксується на час сеансу. Усі пакети використовують цей шлях. Рішення про зміну маршруту між цією парою відправник-одержувач може прийматися лише до початку сеансу зв'язку.

У дейтаграмному режимі передача пакетів за маршрутом може здійснюватися такими способами:

- “послідовна” маршрутизація, коли у заголовку передається лише ідентифікатор вузла-адресата і наступна транзитна ділянка визначається за допомогою маршрутної таблиці. Кожен вузол у дорозі від джерела до адресата виконує цю процедуру;

- маршрутизація відправником, при якій інформація про весь шлях (тобто ідентифікатори проміжних вузлів) попередньо проставляються в маршрутній частині заголовка кожного пакета у вузлі джерела. При топологічних змінах, що змушують змінювати маршрут від джерела до адресата, будь-який проміжний вузол, виявивши відсутність зв'язності, може: 1) перерахувати новий маршрут до місця призначення або 2) "забути" про маршрут джерела та відправити пакет, використовуючи "послідовну маршрутизацію";

- ширококомовна передача, яка передбачає передачу пакета всім вузлам;
- багатокількісна передача, що передбачає розподіл трафіку кількома маршрутами.

Таким чином, можна відзначити, що ключовими питаннями при розробці нових методів маршрутизації є: "Яку інформацію збирати про стан мережі?", "Як часто?", "Яким чином?", "У якому вигляді її зберігати?" та "Як використовувати?" [99]. Крім того, методи маршрутизації повинні відповідати низці важливих вимог. По-перше, ММ повинні забезпечувати побудову раціональних маршрутів для передачі трафіку із заданою якістю; по-друге, ММ мають бути досить простими (не вимагати надто великого обсягу обчислень та передачі значної кількості службового трафіку); по-третє, ММ повинні мати властивість збіжності (завжди приводити до узгодженої побудови маршрутних таблиць за прийнятний час).

2.1.1 Схема системного аналізу і синтезу методів маршрутизації в радіомережах із самоорганізацією

Початок робіт з дослідження методів маршрутизації в в радіомережах із самоорганізацією поклав у 70-80-х роках проект DARPA PRNET (Defense Advanced Research Project Agency Packet Radio Networks) [39]. В даний час велика кількість методів розроблена робочою дослідницькою групою Internet Engineering Task Force (IETF) [40] для мереж MANET. Метою даної робочої групи є стандартизація методів маршрутизації, які використовуючи традиційні IP-сервіси, забезпечували ефективну маршрутизацію в мобільних радіомережах з динамічною топологією. Впровадження протоколу IPv6 дозволить створити в Інтернеті гнучку і масштабовану структуру маршрутизації за рахунок ієрархічної адресації [41]. Однак до кінця не вирішеною залишається проблема

створення ефективних методів маршрутизації IP-пакетів мобільних хостів у мережах Інтернет, оскільки існуючі методи (включаючи IP, Netware IPX, ISO CLNP, AppleTalk) не підтримують мобільні хости.

Усі методи маршрутизації, запропоновані до застосування в радіомережах із самоорганізацією, можна класифікувати за такими ознаками [42]:

- способу побудови та підтримки маршрутів - таблично-орієнтовані (далі табличні), зондові та гібридні;
- кількості одержувачів - однокористувацькі, групові та "хвильові";
- кількості та типу параметрів у метриці вибору маршруту — однопараметричні та багатопараметричні, енергозберігаючі, із заданою якістю обслуговування та ін.
- кількості маршрутів - одношляхові і багатошляхові;
- типу маршрутів - симетричні та асиметричні;
- наявності обладнання позиціонування - координатні та некоординатні;
- організації мережі - ієрархічні та неієрархічні (однорівневі);
- прийняття рішень щодо маршрутизації - пасивні та активні (інтелектуальні).

Завданням методу маршрутизації є створення, зберігання та підтримка маршруту(ів) передачі між відправником та адресатом заданої якості (зазвичай найкоротшої). Найкоротший маршрут визначається як функція мінімальної вартості маршруту, яка визначається як сума вартості всіх каналів маршруту.

Табличні методи маршрутизації передбачають побудову та підтримку маршруту у вузлах мережі на основі ведення ними маршрутних таблиць та обміну маршрутними сполученнями між вузлами. При цьому розрізняють два основні класи, що визначаються алгоритмом пошуку найкоротшого шляху (Дійкстри або Беллмана—Форда).

За допомогою зондових методів маршрутизації будують та оновлюють маршрути на основі зондування мережі спеціальними службовими пакетами (зондами).

За необхідності передачі інформації від одного абонента до кількох (усім) одержувачів виникає необхідність групової (хвильової) маршрутизації.

Залежно від параметрів, що враховуються під час вибору маршруту, розрізняють однопараметричні або багатопараметричні методи маршрутизації.

Якщо необхідно будувати та підтримувати кілька маршрутів передачі (наприклад, вимога щодо безпеки передачі), то говорять про багатошляхову маршрутизацію.

Залежно від типу радіоканалів (через неоднорідну потужність передачі вузлів) можливе застосування асиметричної маршрутизації між парами відправник-адресат.

При зростанні розмірності мережі до сотні та тисячі абонентів виникає завдання впровадження ієрархії управління мережею та, відповідно, ієрархічної маршрутизації.

Якщо ухвалення рішення щодо маршрутизації відбувається на основі використання бази знань, то говорять про активну або інтелектуальну маршрутизацію.

За наявності у вузлах мережі системи позиціонування можливе застосування методів координатної чи географічної маршрутизації.

З іншого боку, кожен клас методів маршрутизації потребує розробки додаткових алгоритмів. Наприклад, ієрархічні методи вимагають вирішення завдань кластеризації та адресації, методи групової маршрутизації – розробки алгоритмів побудови та підтримки групових маршрутів передачі інформації, методи координатної маршрутизації – алгоритмів оперативного управління топологією [44] тощо.

Тому розв'язання проблеми маршрутизації декомпозується на задачі, тобто розробку нових методів маршрутизації необхідно проводити за класами, кожен із яких задовольняє певному виду трафіку, наявному устаткуванню у вузлах чи умовам функціонування радіомереж із самоорганізацією (рис. 2.5).

Методика оцінки ефективності методів маршрутизації в автоматизованих мережах радіозв'язку з динамічною топологією призначена з метою оцінки ефективності методів маршрутизації, що застосовуються в мережах з динамічною топологією.

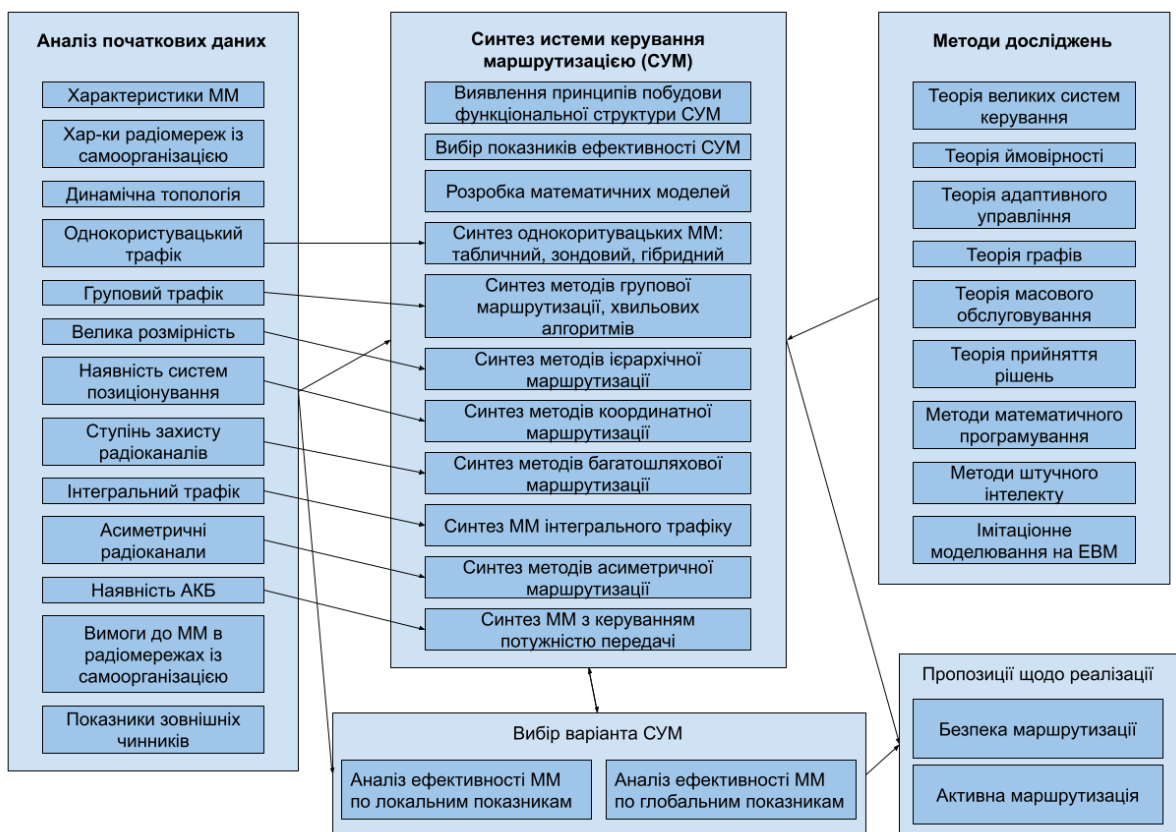


Рис. 2.5 Схеми системного аналізу і синтезу ММ в радіомережах із самоорганізацією

Методика оцінки ефективності ММ в радіомережах із самоорганізацією та динамічною топологією включає наступні етапи.

1. Аналіз функціонування мережі та призначення вихідних даних: параметрів мережі; параметрів множини досліджуваних ММ; вимог до методів маршрутизації

2. Вибір показників ефективності ММ.

3. Оцінка локальних показників ефективності ММ (тимчасова, зв'язкова та обчислювальна складність методу) за класами та вибір найбільш ефективного у своєму класі (формування допустимої множини ММ).

4. Побудова моделі функціонування мережі, моделей функціонування методів маршрутизації та проведення експериментів.

5. Отримання залежностей показників ефективності ММ від умов функціонування мережі.

6. Оцінка ефективності ММ за глобальними показниками (пропускна здатність, середній час затримки повідомлень, співвідношення обсягу службової та корисної інформації).

7. Розглянемо докладніше зміст кожного з етапів.

Економічні і експлуатаційні показники. Характеризують фінансові витрати на розробку ПЗ маршрутизаторів і їх введення в експлуатацію.

2.2. Методи однокористувацької маршрутизації інформаційних потоків у мережах з динамічною топологією

Аналізу та синтезу методів маршрутизації у мережах зв'язку присвячено велику кількість робіт [27-38]. Проте більшість розроблених методів маршрутизації орієнтовано на досягнення оптимального використання мережевих ресурсів за квазістатичних умов роботи мережі, тобто, таких умовах, за яких мережева топологія та трафік змінюються повільно.

Завданням методу маршрутизації є створення, підтримання маршрутів передачі між кожною (передаючою та приймаючою) парою

вузлів по найкоротших шляхах, де найкоротший шлях визначається як функція мінімальної вартості маршруту, тобто сумарною вартістю всіх каналів маршруту.

Усі методи маршрутизації, що застосовуються в радіомережах із самоорганізацією, за способом побудови та підтримки маршрутів можна поділити на три групи: таблично-орієнтовані, зондові та гібридні (рис. 2.6) [42].

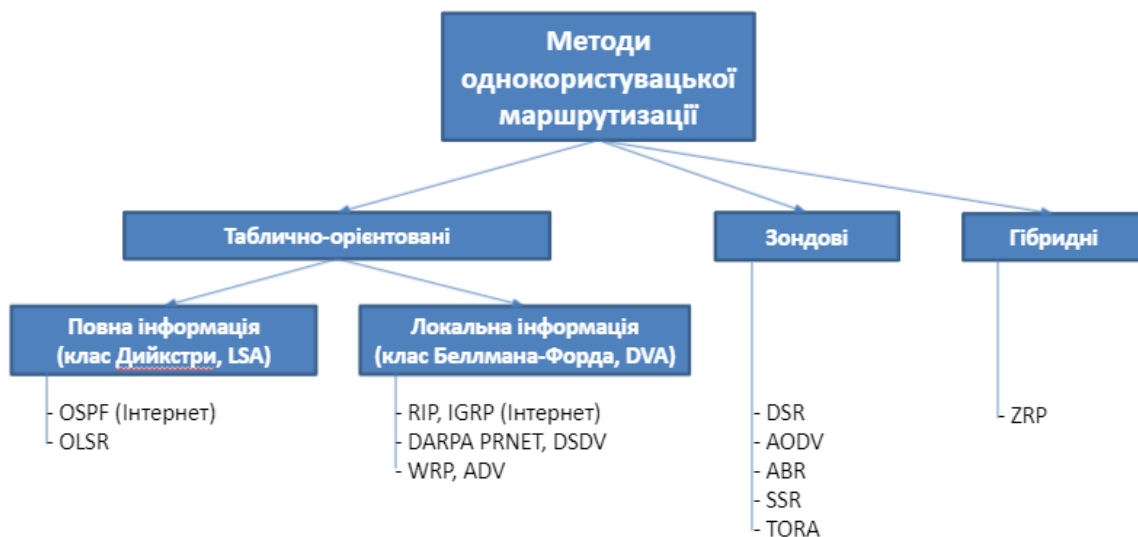


Рис. 2.6. Основні класи методів маршрутизації в радіомережах із самоорганізацією

2.2.1. Таблично-орієнтовані методи маршрутизації

Для таблично-орієнтованих методів маршрутизації відомі два підходи для обчислення найкоротшого шляху в мережі залежно від того, яку інформацію має вузол про стан мережі.

В першому випадку кожен вузол мережі має у своєму розпорядженні повну інформацію про стан мережі. І тут кожен вузол може виконати будь-який централізований алгоритм пошуку найкоротшого шляху. Так працює, наприклад, мережа Інтернет, у якій найкоротший шлях обчислюється за алгоритмом Дійкстри (протокол OSPF) [27, 28, 34]. Для

радіомереж із самоорганізацією запропоновано метод OLSR (Optimized Link State Routing) [45], який є модифікацією OSPF. Його основна відмінність - облік широкомовної природи радіоканалу для скорочення числа передач в алгоритмі розсилки маршрутної інформації.

В другому випадку кожен вузол мережі має у своєму розпорядженні локальну інформацію про стан мережі. Даний клас методів реалізований на основі розподіленої версії алгоритму Веллмана-Форда [27, 28, 34] (метод вектора-відстаней DVA (Distance Vector Algorithms)), який спочатку був реалізований у мережі ARPANET, а сьогодні використовується в мережі Інтернет у протоколах RIP та IGRP . Представниками даного класу методів у мобільних радіомережах є DARPA PRNET (Packet Radio Networks) [39], DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) [46], WRP (Wireless Routing Protocol) [47], ADV (Adaptive Distance Vector Routing) та ін.

Дані методи передбачають ведення кожним вузлом однієї або декількох таблиць, що зберігають інформацію про маршрути доставки інформації до всіх адресатів мережі. Завжди є основна таблиця — маршрутна.

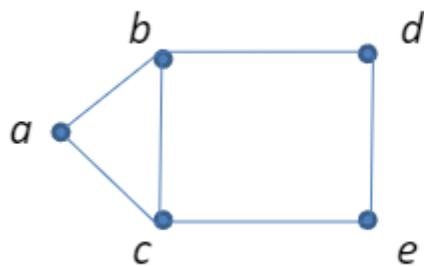
Розглянемо її зміст з прикладу методу маршрутизації мережі DARPA PRNET [39]. Кожен маршрут зберігається у вигляді окремого входу: адресат (j), сусідній вузол (N_j) у найкоротшому маршруті передачі до адресата i вартість маршруту (C_j) (рис. 2.7). Вартість маршруту передбачає суму метрик кожного каналу. Як метрика зазвичай використовується число ретрансляційних ділянок, але можуть використовуватися також затримка доставки пакетів, якість каналу та ін.

Кожен вузол періодично інформує (розсилає маршрутні сполучення, що містять змінені входи маршрутних таблиць) своїх сусідів про маршрути до адресата. Приймавши маршрутне сполучення, вузол i

модифікує свої входи маршрутних таблиць, використовуючи принцип оптимальності динамічного програмування [8]:

$$C^{(p)}(i, j) = \min_k [c(i, k) + C^{(p-1)}(k, j)],$$

де $C^{(p)}(i, j)$ - вартість найкоротшого маршруту від вузла i до адресату j на p - й ітерації; $c(i, k)$ - вартість передачі по каналу $c(i, k)$, $k \in N_i$. Після коригування маршрутних таблиць вузол розсилає маршрутні повідомлення своїм сусідам.



МТ для вузла a

j		
b	b	1
c	c	1
d	b	2
e	c	2

Рис. 2.7. Приклад маршрутної таблиці для вузла a (метод DARPA PRNET)

Недоліком даного методу є необхідність вирішення так званої проблеми кінцевого рахунку. Алгоритм вимагає більшої кількості ітерацій для завершення роботи (у гіршому випадку N ітерацій, де N - число вузлів мережі), викликає зациклювання маршрутів, у деяких ситуаціях генерує більшу кількість маршрутних повідомлень.

Метод DSDV [46] є таблично-орієнтованим, заснований на алгоритмі Беллмана-Форда і покращив його за рахунок відсутності зациклювання маршрутів. Кожен мобільний вузол підтримує маршрутну таблицю до всіх можливих адресатів мережі. Кожен її вхід позначається порядковим номером, визначеним адресатом (таблиця 2.1). Структура маршрутної таблиці методу DSDV показана на таблиці 2.1. Порядковий номер маршруту n_m дозволяє вузлам розрізняти "старий" маршрут і "новий" для уникнення формування маршрутних циклів [48]. Маршрутні таблиці періодично коригуються. Для зменшення обсягу службового

трафіку маршрутні сполучення бувають двох типів. Перший тип містить повну маршрутну інформацію вузла і передається рідко, другий лише змінену маршрутну інформацію і може включатися в пакет каналного доступу. У разі відмови каналу маршруту, що проходить через нього, призначається нескінченна метрика та коригується його порядковий номер.

Таблиця 2.1

Ідентифікатор адресата j	Наступний вузол на шляху до адресата N_j	Число повторних прийомів C_j	Порядковий номер маршруту n_M
----------------------------	--	--------------------------------	---------------------------------

Усі маршрутні сполучення нумеруються. Нумерація дозволяє розрізнити нову та стару інформацію та гарантує, що кожне маршрутне сполучення передаватиметься кожним вузлом своїм сусідам не більше одного разу.

Перевага методу – відсутність зациклювання маршрутів. Недоліки: труднощі визначення оптимального значення максимального часу встановлення маршруту для окремого адресата, що призводить до коливань маршруту і додаткової розсилки маршрутних повідомлень; використання обох способів розсилки маршрутних повідомлень (періодичного та подійного), що викликає додатковий службовий трафік; очікування вузлом для коригування входу маршрутної таблиці до певного одержувача маршрутного сполучення від цього одержувача; не підтримує групову маршрутизацію.

На жаль, жоден із перелічених підходів не відповідає сформульованим вимогам до методів маршрутизації в радіомережах із самоорганізацією з динамічною топологією. Підхід з повною інформацією для обчислення найкоротшого шляху мережі вимагає великої кількості інформації про стан мережі, яка повинна надійно доставлятися кожному

вузлу від інших вузлів мережі. Ця інформація повинна надсилатися при кожній зміні мережевої топології або вартості каналу. Затримка в доставці такої інформації, особливо в радіомережах із самоорганізацією, а також додаткове навантаження на мережу службовими повідомленнями є значними.

Алгоритм Беллмана—Форда вимагає вирішення проблеми “кінцевого рахунку”, викликає зациклювання маршрутів протягом його виконання (ця проблема вирішена у методі DSDV за рахунок введення нумерації маршрутів), вимагає N ітерацій (де N — кількість вузлів у мережі) для збіжності, у разі неправильного прийому маршрутної інформації призводить до блокування. Якщо відстань, що обчислюється, обмежена, то не виявляється поділ мережі на окремі підмережі.

Тому був запропонований таблично-орієнтований метод маршрутизації WRP для радіомереж із самоорганізацією та змінним числом вузлів, який має позитивні властивості розподіленої версії алгоритму Беллмана-Форда і, крім того, перешкоджає зациклюванню маршрутів, зменшує час збіжності, забезпечує кілька маршрутів доставки інформації [47, 49].

Метод WRP передбачає, що кожен вузол має свій ідентифікаційний номер (ІН), канали радіозв'язку двонаправлені, як вартість шляху обрано єдиний параметр - кількість ретрансляцій. Алгоритм, що реалізує метод, збігається незалежно від числа вузлів і заснований на веденні кожним вузлом трьох таблиць (U^x): маршрутної таблиці (MT), таблиці відстаней (TP) та таблиці сусідів (TC).

В маршрутній таблиці вузла i (MT_i) зберігається дерево, що з'єднує вузол i з усіма вузлами мережі найкоротшим шляхом. Маршрутна таблиця розмірності $N \times 4$, де N - кількість вузлів мережі. Елементами таблиці (рис 2.9, в) є: j - вузол адресат; N_j^i - наступний вузол на

найкоротшому маршруті від i до j ; A_j^i - проміжний вузол (передостанній) в найкоротшому маршруті до j (відстань до нього від вузла i дорівнює $D_j^i - 1$); D_j^i - довжина найкоротшого маршруту від вузла i до j , що виражена числом ретрансляцій; $F_j^i = \{0,1\}$ - флаг, що визначає збільшення D_j^i ($F_j^i = 1$) з часом передачі i -м вузлом останнього маршрутного повідомлення.

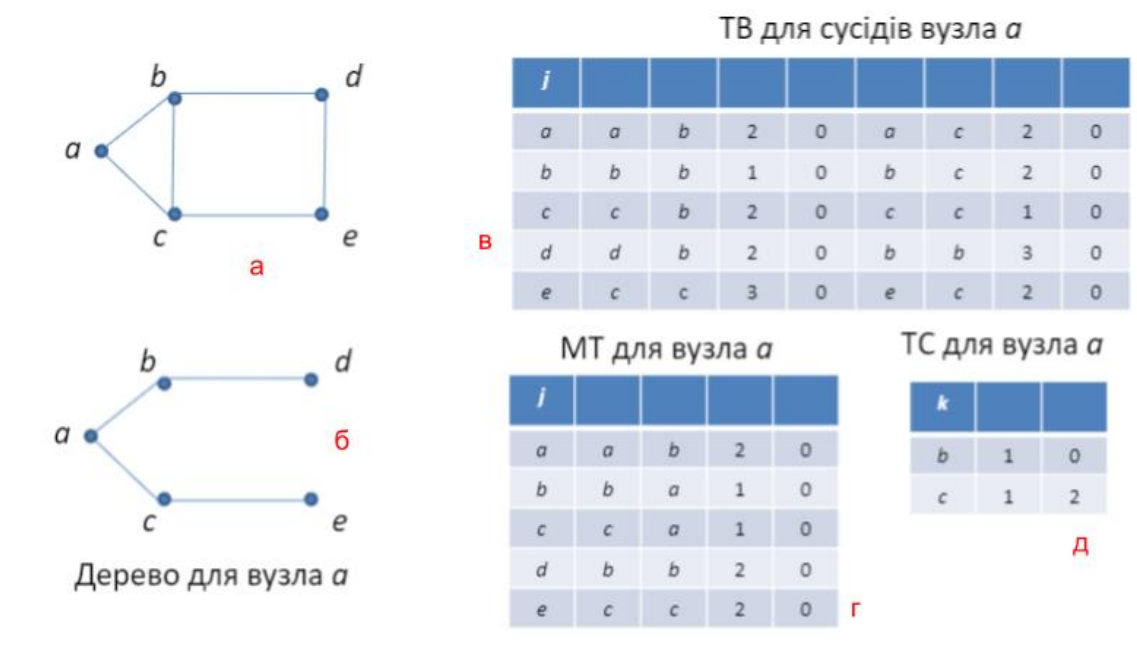


Рис. 2.9. Приклад радімережі із самоорганізацією і зміст таблиці вузла a

При ініціалізації маршрутної таблиці вузла i (рис 2.9, г) містить наступні значення: $A_j^i = N_j^i = i, D_j^i = 0, F_j^i = 0$.

Таблиця відстаней i (рис 2.9, в) містить дерева джерела, які визначаються своїми сусідами. Її розмірність $|N| \times 4 \times |N_i|$ де N_i - множина сусідів вузла i . Елементи таблиці, показані на рис 2.9: j - адресат; k - вузол - сусід вузла i ; N_{jk}^i - наступний вузол на найкоротшому шляху від k до j ; A_{jk}^i - передостанній вузол перед j ; D_{jk}^i - найкоротша відстань від i до j через вузол k ; $F_{jk}^i = \{0,1\}$ - флаг, що вказує на збільшення D_{jk}^i ($F_{jk}^i = 1$) з останнім отриманим маршрутним повідомленням від вузла k .

Маршрутні повідомлення періодично надсилаються (асинхронно) кожним вузлом через $t_{\text{пр}}$ одиниць часу. Формат маршрутного повідомлення i -го вузла (MC_i): $IN_j, A_j^i, N_j^i, D_j^i$ для всіх j в маршрутній таблиці i -го вузла.

Таблиця сусідів розмірності $|N_i| \times 2$ (рис 2.9., д) містить такі елементи: k - сусідній вузол; $R_k^i = \{0,1\}$ - флаг прийому $MC_k (R_k^i = 0)$ після передачі йому MC_i ; G_k^i - показник якості зв'язку з сусідом, що дорівнює числу періодів розсилки маршрутного повідомлення i -м вузлом без підтвердження його прийому k -им вузлом.

На рис. 2.9, а показана радіомережа із самоорганізацією з п'ятьма вузлами. Передбачається, що всі вузли пов'язані зі своїми сусідами, вузол а передав своє останнє маршрутне сполучення і не прийняв маршрутне сполучення від вузла с. На рис. 2.9, б показано T_a .

Вузли мережі можуть виявляти два типи топологічних змін: відсутність радіозв'язку зі "старим" сусідом та встановлення радіозв'язку з "новим" сусідом.

Відсутність зв'язку зі своїми сусідами виявляється двома способами: відсутністю інформаційного трафіку даного сусіда та маршрутного сполучення після періоду виявлення зв'язності $t_{\text{пос}}$, що дорівнює декільком $t_{\text{пр}}$ (для методу маршрутизації DARPA PRNET $t_{\text{пос}} = 4 t_{\text{пр}} = 45\text{с}$ [39]); відсутністю квитанції на передане повідомлення протягом її очікування.

Вузол встановлює радіозв'язок із новим вузлом після прийому його маршрутного сполучення. Передача інформаційних пакетів може здійснюватися наступними способами (U^p).

1. Послідовна маршрутизація. Вузол-відправник шукає в маршрутній таблиці наступний вузол на шляху до адресата та передає йому пакет; кожен вузол у дорозі від джерела до місця призначення виконує аналогічні дії.

2. Маршрутизація відправником. Вузол-відправник фіксує в заголовку пакета ІН ретрансляторів маршруту "відправник → адресат". Перевага цього способу: відсутність зациклювання за наявності радіозв'язку між вузлами, зазначеними в заголовку. При топологічних змінах, що змушують змінити маршрут від джерела до місця призначення, будь-який ретранслятор може визначити новий маршрут до місця призначення або надіслати пакет, використовуючи послідовну маршрутизацію.

3. Широкомовна передача або багатошляхова маршрутизація. Передбачається передача пакета всім або декільком вузлам мережі.

Відмінною особливістю методу OLSR від протоколу OSPF (обидва використовують для пошуку найкоротшого шляху алгоритм Дійкстри) є зменшення розмірів і кількості маршрутних повідомлень, що розсилаються в мережі. Для цього при проведенні коригування маршрутів кожен вузол призначає певну множину сусідніх вузлів MPR-вузлів (Multipoint Relays), відповідальних за ретрансляцію службових пакетів. Вузол, що не входить у цю множину, не ретранслює пакет. Для реалізації цієї процедури кожен вузол періодично передає сусідам hello-повідомлення, які містять списки всіх сусідів. З цього списку кожен вузол вибирає підмножину сусідів, що покривають усі вузли, що знаходяться на відстані двох ретрансляцій. Наприклад на рис. 2.10 вузол *A* може вибрати як ретранслятор маршрутної інформації (як MPR-вузли) вузли *B, C, K, N* (ці вузли покривають всі вузли, що знаходяться від *A* на відстані двох ретрансляційних ділянок). Кожен вузол обчислює найкоротші маршрути за критерієм мінімуму ретрансляцій виходячи з двох таблиць (топологічної та таблиці сусідів).

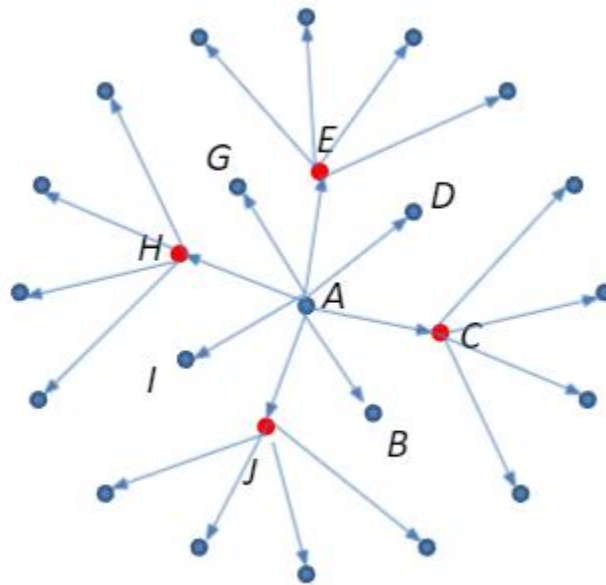


Рис.2.10. Приклад розсилки маршрутної інформації для OLSR

Перевага даного методу: підтримка маршрутів у актуальному стані, менший службовий трафік порівняно з OSPF. Недоліком є все-таки значний службовий трафік, який у загальному випадку можна порівняти з хвильовою розсилкою.

2.2.2. Оцінка ефективності таблично-орієнтованих методів маршрутизації

В табл. 2.1 показані особливості побудови, функціонування та потенційні можливості кожного з приведених методів маршрутизації. У табл. 2.2 представлено порівняльну оцінку таблично-орієнтованих методів маршрутизації за локальними показниками. Аналіз даної таблиці дозволяє зробити такі висновки.

Основним недоліком методу QLSR, заснованого на алгоритмі Дійкстри [34], є передача значних обсягів службової інформації $O(N) *$ всім вузлам мережі за будь-якої зміни топології (вартості каналу) мережі та значна обчислювальна складність зі збільшенням розмірності мережі $O(N \times N)$.

Таблиця 2.1

Особливості побудови і потенційні можливості ММ	OLSR	DARPA PRNET	DSDV	WRP
Алгоритм обчислення найкоротшого шляху	Дійкстри	Беллмана-Форда		
Маршрутна метрика	Ретрансляційна ділянка			
Частота розсилки маршрутних повідомлень (МП)	Періодична і по подіям			
Глибина розсилки маршрутних повідомлень (МП)	Всім	Тільки сусіднім вузлам		
Порядкова нумерація маршрутів	Ні	Ні	Так	Ні
Застосування в МТ інформації про передостанній вузол до адресату	Ні	Ні	Ні	Так
Застосування Hello пакетів	Так	Так	Так	Так
Можливість групової маршрутизації	Ні	Ні	Ні	Так
Можливість ієрархічної маршрутизації	Так	Так	Ні	Так
Можливість багатошляхової маршрутизації	Ні	Ні	Ні	Так
Можливість QoS маршрутизації	Так	Ні	Так	Так
Можливість асиметричної маршрутизації	Ні	Так	Так	Так

Таблиця 2.2.

Параметри\ ММ	OLSR	DARPA PRNET	DSDV	WRP
Часова складність (відмова/поява каналу)	$O(d)^*$	$O(d)$	$O(d)$	$O(h)$
Зв'язна складність (відмова/поява каналу)	$O(N)^*$	$O(x=N)$	$O(x=N)$	$O(x=N)$
Кількість та розміри таблиць	2, $O(N \times N)$	1, $O(N \times N_i)$	2, $O(N \times N_i)$	3, $O(N \times N_i)$

Таблично-орієнтовані методи DARPA PRNET, DSDV, WRP є представниками одного класу (Беллмана-Форда), і тому їх тимчасова та зв'язкова складність однакова для найгіршого випадку – $O(d)$. WRP має кращу тимчасову складність $O(h) \leq O(d)$.

Метод WRP вирішує проблему збіжності за рахунок використання в маршрутних таблицях додаткової інформації про сайт, що передує адресату. Проте він вимагає ведення трьох маршрутних таблиць, зберігання яких збільшує обсяг пам'яті маршрутизаторів зі збільшенням розмірності мережі (що критично за умов сучасного розвитку рівня інтегральних мікросхем пам'яті). Таким чином, найкращі параметри серед таблично-орієнтованих ММ має WRP.

Характерним недоліком названих таблично-орієнтованих ММ є використання hello-пакетів, що призводить до збільшення службового навантаження і не дозволяє забезпечити режим "мовчання".

2.2.3 Зондові методи маршрутизації

Основна відмінність зондових методів маршрутизації від таблично-орієнтованих методів у тому, що вузли формують маршрут передачі інформації але в міру необхідності шляхом розсилки по мережі службових пакетів малого обсягу (зондів-запитів) та збору зондів-відповідей, що містять інформацію про можливі маршрути передачі інформації. Тому зондова маршрутизація передбачає два основні етапи функціонування: створення маршруту та його підтримку в актуальному стані. Представниками зондових методів маршрутизації є DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector), TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm), ABR (Associativity-Based Routing), SSR (Signal Stability Routing) [50-53] та ін. Для зондових методів маршрутизації характерні значний службовий трафік та певна інерційність у побудові маршрутів.

Розглянемо реалізацію зондових методів маршрутизації на прикладах DSR та AODV, запропонованих до стандартизації дослідницькою групою IETF [40].

Метод DSR [50] передбачає два етапи функціонування: створення та підтримання маршруту.

Створення маршруту. Відправник (вузол 1), не маючи маршруту та бажаючи передати пакет адресату (вузлу 8), передає сусіднім вузлам зонд-запит, що містить ідентифікатор адресата (рис. 2.11). Вузол, прийнявши зонд-запит, може вчинити так. Якщо він не знає маршруту до адресата, він додає свій ідентифікатор в зонд-запит і передає його далі своїм сусідам (це дозволить отримати зворотний шлях передачі і уникнути зациклювання маршруту). В іншому випадку (або при досягненні зондом-запитом адресата) відправнику надсилається зонд-відповідь із зазначенням маршруту. Вузол-відправник, отримавши зонд-відповідь, поміщає маршрут у свій кеш. Проміжні вузли, що передають зонди-відповіді, також зберігають отримані маршрути до адресата та відправника.

Підтримка маршруту. Підтримка маршруту може здійснюватися двома способами: активним та пасивним. У першому випадку, якщо проміжний вузол k виявив відмову каналу (який є складовою частиною маршруту для i -го вузла), вузол посилає зонд-відмову маршруту вузлу i . У другому випадку будь-який вузол може прослуховувати наявність ретрансляцій сусіда та здійснювати пасивний контроль наявності маршруту на відстані однієї ретрансляційної ділянки. При отриманні відправником зонда-відмови він ініціює створення нового маршруту.

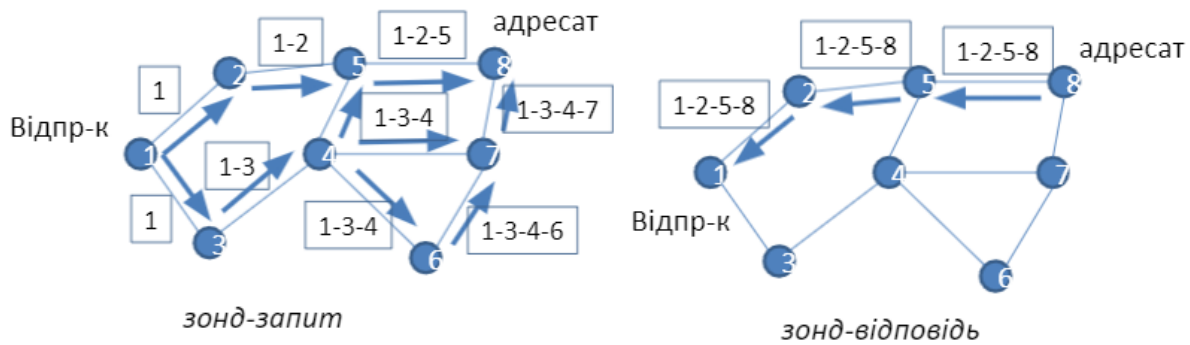


Рис. 2.11. Етап створення маршруту (метод DSR): розсилка зондів-запитів, передача зонда-відповіді

Переваги методу: швидка адаптація до зміни топології мережі; відсутність періодичної передачі службової інформації. Недолік: значний обсяг службової інформації зі збільшенням розмірності мережі.

Метод AODV [51] є комбінацією методів DSR і DSDV. Побудова та підтримка маршрутів здійснюється зондуванням мережі. Для підтримки інформації про “нові” маршрути використовується порядкова нумерація маршрутів. Метод використовує чотири типи повідомлень: зонд-запит, зонд-відповідь, зонд-коригування та hello-повідомлення. Формат зондів показано на рис. 2.12 та 2.13 (у квадратних дужках зазначено число відведених біт).

Тип повідомлення [8]	Резервне поле [11]	Число ретрансляцій [8]
Ідентифікатор ширококомовної передачі [32]		
IP адресата [32]		
Порядковий номер адресата [32]		
IP відправника [32]		
Порядковий номер відправника [32]		

Рис.2.12 Формат зонда-запиту (метод AODV)

Формат hello-пакета аналогічний формату зонда-відповіді при зміні вмісту його полів: $L = 0$, “число ретрансляцій” має значення нуль, у полях “IP адресата та його номер” записано свою власну IP-адресу та номер і, крім того, міститься список сусідніх вузлів. Зонд-коригування має поля, аналогічні зонду-відповіді, крім поля числа ретрансляцій, яке встановлено в нескінченність і значення поля порядковий номер адресата збільшено на одиницю.

Маршрутна таблиця кожного вузла містить таку інформацію: IP адресата та її порядковий номер, число ретрансляцій до адресата, наступний вузол на шляху до адресату, час функціонування маршруту, список активних сусідів.

Тип повідомлення [8]	$L = 1$	Резервне поле [11]	Число ретрансляцій
IP адресата [32]			
Порядковий номер адресата [32]			
Час прийняття зонда-запиту [32]			

Рис.2.13 Формат зонда-відповіді (метод AODV)

Функціонування методу відбувається наступним чином. При необхідності передачі пакета вузол звертається до маршрутної таблиці за маршрутом. У разі його відсутності передається зонд-запит усім сусіднім вузлам. Проміжні вузли, прийнявши зонд-запит і не маючи маршруту до адресата, ретранслюють запит далі. Адресат, який отримав зонд-запит, формує зонд-відповідь та надсилає його відправнику. Відправник, отримавши зонд-відповідь, коригує свою маршрутну таблицю.

Переваги методу: забезпечення відсутності зациклювання маршрутів, вирішення проблеми кінцевого рахунку, гарантування

отримання нових маршрутів, підтримка групової маршрутизації. Недолік: використання hello-повідомлень.

Метод TORA ґрунтується на перетвореннях спрямованих графів [54]. Суть методу полягає у побудові (за допомогою розсилки відправником зондів-запитів та збору зондів-відповідей) та підтримці (обмін зондами-коригування) правильної маршрутної мережі (вагового спрямованого ациклічного графа G_{o-a} з коренем у вузлі-відправнику та кінцевою вершиною у вузлі-адресаті):

$G_{o-a} = (N_i, K_{ij}), H_o > \dots > H_i > H_a$, де $K_{ij} = \downarrow$ ($K_{ij} = \uparrow$) - напрям каналу від вузла i до вузла j “вниз” (“вгору”), який визначається співвідношенням ваги сусідніх вузлів ($j \in N_i$); H_o, H_i, H_a - ваги вузлів відправника, i -го вузла, адресата, відповідно.

За рахунок наявності кількох маршрутів доставки повідомлень відмова одного з них не призводить до необхідності перебудови всієї маршрутної мережі та тим самим значно зменшує обсяг службового трафіку. Метод виконується вузлом у міру необхідності та гарантує відсутність зациклювання маршрутів.

Зберігання маршрутної інформації $\{U^x\}$. В запропонованому методі вузол зберігає “напрямок” передачі (наступний ретранслятор) для даного адресата. Кожен i -й вузол мережі відносно конкретного адресата має вагу $H_i = (t_i, \beta_i, r_i, d_i, i)$, де t_i - час відмови каналу; β_i - ідентифікатор вузла, що створює відносний рівень ієрархії вузлів; r_i - біт, що розділяє рівень на два підрівня і використовується для виявлення розділу мережі на окремі підмережі; d_i - ціле число, що використовується для впорядкування вузлів на загальному рівні і служить для розповсюдження нового відносного рівня; i - унікальний ідентифікатор вузла. Всі ідентифікатори вузлів впорядковані з метою встановлення пріоритету і виключення конфліктної

ситуації ($a \leq b \leq c \leq \dots \leq z$). Перші три значення t_i, β_i, r_i визначають новий відносний рівень вузла.

Від самого початку вага кожного вузла мережі не визначена: $H_i = (-, -, -, -, i)$. В подальшому вага вузлів буде змінюватися. Вага адресата, наприклад F , спочатку рівна нулю - $H_F = (0,0,0,0,F)$. Крім того, кожен вузол зберігає вагу своїх сусідніх вузлів $j \in N_i$ ($H_{N_{ij}} = (-, -, -, -, j)$ для кожного j) і стану каналів. Кожен канал $K_{ij} \in L$ може знаходитись в одному з трьох станів:

- неспряваний ($K_{ij} = -$), якщо вага вузла j не визначена;
- спрямований від вузла i до вузла j (якщо ($H_i > H_j$) або H_i - визначений, а H_j - не визначений) - канал “вниз” ($K_{ij} = \downarrow$) відносно вузла i .
- спрямований від вузла j до вузла i ($H_i \leq H_j$) - канал “вверх” ($K_{ij} = \uparrow$) відносно вузла i .

Функціонування TORA включає три основні етапи: створення маршруту передачі інформації, його підтримка (оптимізація) та знищення.

Метод ABR як метрику вибору маршрутів використовує стабільність радіоканалу, що визначається кількістю прийнятих за певний час сигналів “присутності” сусідів. Переваги: вибір більш стабільних маршрутів призводить до меншої кількості перебудов маршрутів. Недоліки: вибрані маршрути не є найкоротшими, необхідність постійної передачі сигналу “присутності”.

Метод SSR вибирає маршрут, використовуючи часовий та енергетичний параметри: тривалість існування каналу та потужність сигналу. Кожен вузол містить сигнальну та маршрутну таблиці. Перевага: вибирає стабільніші маршрути; недоліки: проміжні вузли не можуть повідомити відправнику про наявний маршрут до адресата, що призводить до значної затримки під час побудови маршруту; не завжди вибираються найкоротші маршрути.

2.2.4 Оцінка ефективності зондових методів маршрутизації

У табл. 2.3 показано особливості побудови, функціонування та потенційні можливості зондових методів маршрутизації.

Основні характеристики зондових методів маршрутизації представлені у табл. 2.4. Тимчасова та зв'язкова складність зондових ММ: на етапі ініціалізації однакова для всіх методів; на етапі відмови - найкращі параметри TORA. Методи маршрутизації AODV і DSR схожі, хоча вони мають суттєві відмінності. Найбільша відмінність у форматі зондів, що передаються при побудові маршрутів. Якщо зонд методу DSR несе повну інформацію про маршрут (зі зростанням розміру мережі збільшується обсяг службової інформації), то в методі AODV інформацію дає лише ідентифікатор адресата і відправника. Метод DSR зберігає повну інформацію про маршрути, а метод AODV — лише про найближчих ретрансляторів. Метод AODV не може використовувати асиметричні канали, а метод DSR може функціонувати за цих умов.

Таблиця 2.3

Особливості побудови і потенційні можливості ММ	AODV	DSR	SSR	ABR	TORA
Маршрутна метрика	Найкоротший і «новий» мар-т	Найкоротший маршрут	Стабільний і якісний мар-т	Стабільний і найкор. мар-т	Найкоротший маршрут
Способи підтримки маршрутів	Видалення маршруту, оповіщення відправника			Локалізація зондів-запитів	Зміна напрямку каналу
Пакети «Присутності»	Так	Ні	Так	Так	Ні
Групова маршрутизація	Так	Ні	Ні	Ні	Так
Багатошляхова маршрутизація	Ні	Так	Ні	Ні	Так
Ієрархічна маршрутизація	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Асиметрична маршрутизація	Ні	Так	Ні	Ні	Так
QoS маршрутизація	Ні	Так	Ні	Ні	Так

Метод DSR призначений для використання в мережах малої розмірності та незначною швидкістю переміщення вузлів. Його переваги – відсутність сигналів присутності (отже, додаткова службова інформація не вноситься), наявність та зберігання маршрутів до адресата у кеші. Однак

на відміну від інших зондових методів в DSR фактично відсутній етап підтримки маршруту (у разі відмови каналу в первинному маршруті знову починається етап побудови маршруту).

У методі ABR вибирається маршрут із найбільшим часом існування (підрахунок сигналів присутності). Недоліки методу: кожен вузол повинен передавати сигнал присутності, вибираються найкоротші маршрути.

Метод маршрутизації SSR є різновидом ABR. Він вибирає найбільш стабільні та якісні (за рівнем сигналу) канали. Недоліки методу аналогічні недолікам ABR. Крім того, час затримки при побудові маршруту є значним.

Таблиця 2.4

Параметри\ ММ	AODV	DSR	SSR	ABR	TORA
Часова складність:					
- Побудова маршруту	$O(2d)$	$O(2d)$	$O(d+z)$	$O(d+z)$	$O(2d)$
- Підтримка маршруту (відмова каналу)	$O(2d)$	$O(2d)$	$O(l+z)$	$O(l+z)$	$O(2d)$
Зв'язна складність					
- Побудова маршруту	$O(2N)$	$O(2N)$	$O(N+y)$	$O(N+y)$	$O(2N)$
- Підтримка маршруту (відмова каналу)	$O(2N)$	$O(2N)$	$O(x+y)$	$O(x+y)$	$O(2x)$
Кількість та розміри таблиць	1, $O(NxNi)$	0, $O(Nxd)$ кеш	1, $O(NxNi)$	2, $O(NxNi)$	1, $O(NxNi)$
Зациклюваність маршрутів	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні

Переваги TORA: отримання кількох маршрутів до адресата, забезпечення режиму мовчання, мінімізація реакції на топологічні зміни в мережі.

Однак зондові методи мають інерційність у побудові маршруту, викликають значний службовий трафік зі збільшенням кількості пар відправник-адресат. Для мінімізації обсягу службового трафіку, зменшення часу побудови маршруту зондовими методами запропоновані такі способи [55]:

- локальне зондування (обмеження зони розсилки зондів граничною величиною);

- селективний вибір вузлів для ретрансляції зондів за рахунок застосування хвильових методів передачі;

- двоетапна побудова адресатом маршруту заданої якості;
- завчасна побудова нового маршруту;
- навчання маршрутів та їх оптимізація;
- побудова маршрутів (зондування) адресатом.

На цей час для стандартизації групою IETF (Internet Engineering Task Force) запропоновані методи OLSR, DSR, AODV [40].

Загальна порівняльна характеристика зондових та табличних методів представлена у табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Характеристика \ ММ	Зондові	Таблично-орієнтовні
Побудова маршрутів	По мірі необхідності до визначених вузлів на основі зондування мережі. Затримка в отриманні маршруту (-), побудова маршруту за необхідністю (+)	Постійно, кожним вузлом до всіх вузлів на основі обміну МТ і обчислення маршруту. Вибір маршруту без затримки (+), постійний службовий трафік (-)
Об'єм службового трафіку:		
- Висока динаміка топології	Менше (+)	Більше (-)
- Низька динаміка топології	Більше (-)	Менше (+)

2.2.5. Гібридний метод маршрутизації

Проведені дослідження показали [56-60], що таблично-орієнтовані методи маршрутизації ефективні при незначній динаміці мережевої топології, зондові – при середньому та високому значеннях зміни

топології ($v_H \ll v \ll v_B$, де v_H, v_B – верхня та нижня межі застосування зондових методів маршрутизації), хвильові — за дуже високої динаміки, тобто ситуації, коли неможливо відстежити зміни топології мережі.

Для досягнення ефективного функціонування радіомережі із самоорганізацією залежно від динаміки мережевої топології можна використовувати гібридний метод маршрутизації ZRP (Zone Routing Protocol) [61]. Він дозволяє здійснити адаптацію динаміки зміни топології мережі, тобто, здійснювати перехід від таблично-орієнтованих методів до зондових і навпаки.

Суть методу ZRP. Кожен i -й вузол мережі зберігає маршрутну інформацію про сусідні вузли на відстані R -ретрансляційних ділянок (так званої маршрутної зони $R_{мз}$) згідно з правилами функціонування табличних методів маршрутизації. Більш точно, маршрутна зона вузла $M_{zi}(R) = \{j \mid d(i, j) \leq R\}$ - це безліч вузлів j , що знаходяться від i на відстані $d(i, j)$, вираженому числом ретрансляційних ділянок, меншим або рівним R .

Побудова та підтримка маршрутів до адресатів, що знаходяться всередині зони, здійснюється таблично-орієтованим ММ (періодичне коригування маршрутних таблиць), за межами – зондовим методом (розсилка зондів-запитів та збирання зондів-відповідей). Для зменшення службового трафіку в запропонованому методі (на відміну від хвильового характеру поширення зондів при зондовій маршрутизації) реалізовано локальне розсилання зондів-запитів по так званому зондовому дереву (корінь у цьому вузлі, а кінцевими вершинами є периферійні вузли). Архітектура гібридного методу маршрутизації представлена на рис. 2.20.

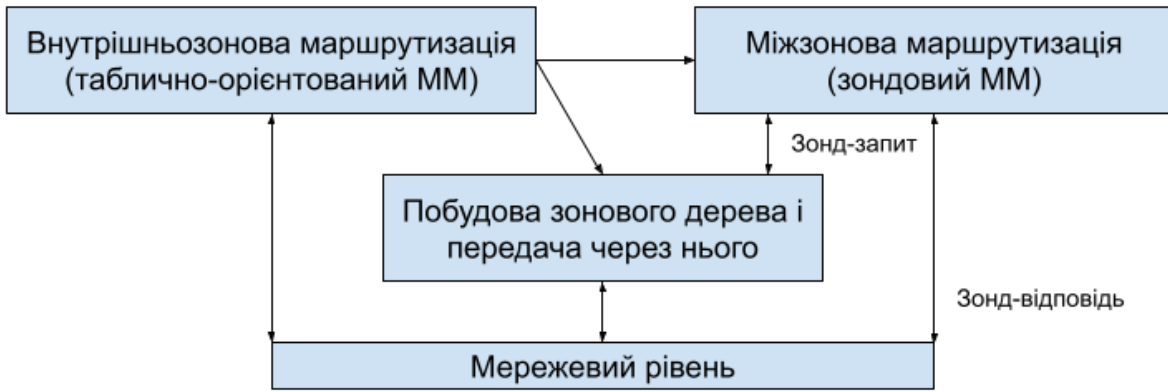


Рис. 2.20 Архітектура гібридного методу маршрутизації

Внутрішньозонава маршрутизація. Процес побудови зони базується на знанні вузлом своїх сусідів. Вузол встановлює радіозв'язок зі своїм сусіднім вузлом шляхом обміну з ним hello-повідомленнями, використовуючи один із протоколів канального рівня. Процес збору, коригування маршрутної інформації в $R_{МЗ}$ може здійснюватися згідно з таблично-орієнтованим методом маршрутизації. Відмінними рисами запропонованого методу є обмеження глибини розсилки маршрутних повідомлень (обмежене значення $h_p = R - 1$) та виділення периферичних вузлів зони. Розсилка маршрутних повідомлень (періодична та подійна) дозволяє кожному вузлу сформувати маршрутні таблиці, що зберігають інформацію про вузли своєї маршрутної зони з виділеними периферійними вузлами. Так як коригування маршрутних таблиць здійснюється локально (у межах $R_{МЗ}$, то обсяг внутрішньозонавого службового трафіку $V_{ВТ} = f(R_{МЗ}, v_{МЗ})$ залежить від розміру зони та інтенсивності зміни топології всередині зони і не залежить від розмірності мережі.

Міжзонава маршрутизація. Процес побудови маршрутів за межами $R_{МЗ}$ здійснюється згідно з правилами функціонування зондових методів маршрутизації. У разі поширення зондів-запитів можливе виникнення

трьох ситуацій: завершення розсилки зондів-запитів при досягненні межі мережі або її повернення до відправника та маршрут знайдено.

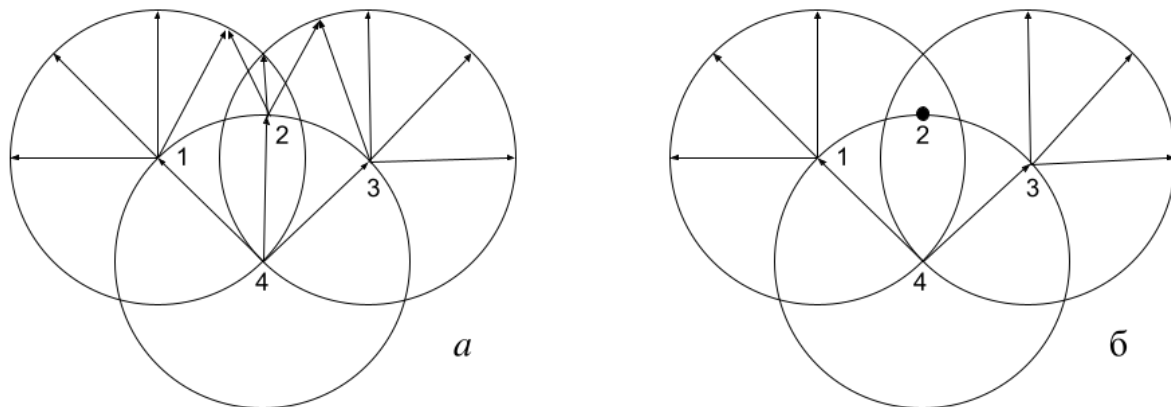


Рис. 2.22. Процес розсилки зондів-запитів: *a* - повна розсилка зондів-запитів; *б* - селективна розсилка зондів запитів

Для скорочення службового трафіку під час розсилки зондів-запитів пропонуються такі правила.

1. Розсилка зондів-запитів здійснюється лише зоновим деревом (вузол розсилає зонд-запит через периферійні вузли).

2. Пасивний аналіз передач зондів-запитів виконується вузлами зони, що не належать зоновому дереву розсилки.

3. Селективний вибір периферичних вузлів здійснюється для організації необхідного "напрямку передачі" зондів-запитів. Концептуально цей механізм представлений на рис. 2.22. Вузол 4 посилає зонди-запити периферійним вузлам 1 та 3.

Висновки

На основі проведеного аналізу можна виділити таблично-орієнтовані, зондові та гібридні методи маршрутизації.

Таблично-орієнтовані методи маршрутизації (OSPF, ADV, DSDV, WRP та інші) ефективні при незначній динаміці мережевої топології. В

мережах з високою частотою змін мережевої топології таблично-орієнтовані методи генерують та надсилають занадто велику кількість службової інформації (hello-пакети), що недопустимо для певних задач, де використовуються FANET.

Зондові методи (DSR, TORA, AODV) можуть бути використані в мережах із середньою та високою динамікою мережевої топології і, в свою чергу, не потребують побудови таблиць маршрутизації для всіх вузлів в мережі, але викликають значний службовий трафік при нестабільному з'єднанні або втраті існуючого маршруту, за рахунок збільшення кількості зондів для пошуку маршруту між відправником та адресатом.

Для мереж з невідомою частотою змін мережевою топології ефективним є гібридний метод (ZRP), який застосовує маршрутні таблиці для маршрутизації в межах спеціально створених локальних маршрутних зон. Для побудови та підтримки маршрутів за межами маршрутних зон метод ZRP використовує розсилку зондів, які можуть надавати інформацію про маршрут до наступної маршрутної зони.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ В МЕРЕЖАХ FANET

3.1 Огляд FANET мереж відносно методів маршрутизації

БПЛА визначається як будь-який літальний апарат, на борту якого немає людини-оператора. У багатьох сучасних застосуваннях БПЛА повинні співпрацювати, щоб зменшити затримку передачі даних та підвищити надійність мережі. Взаємодія, яка здійснюється за допомогою бездротового зв'язку, дозволяє БПЛА обмінюватися інформацією між собою [62]. Ці БПЛА утворюють безпілотну літаючу мережу Ad Hoc (UAANET) [63]. У мережах UAANET відносно низька кількість БПЛА та їх висока мобільність (викликає постійні зміни топології) викликають проблеми з мережевим підключенням. Тому UAANET потребує ефективної архітектури мережі для боротьби з цими обмежуючими топологічними особливостями. Незважаючи на те, що для MANET було запропоновано багато традиційних протоколів маршрутизації [64-66], їх продуктивність буде низькою (як ми покажемо пізніше, використовуючи Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) як репрезентативний протокол), і вони не використовують унікальні особливості UAANET. Як результат, необхідно знайти нові ефективні протоколи маршрутизації, які показують кращі результати в таких мережах.

Тому був знайдений новий протокол під назвою Reactive-Greedy-Reactive (RGR) [98], який поєднує переваги реактивної маршрутизації та Greedy Geographic Forwarding (GGF). Протокол використовує той факт, що БПЛА мають доступ до точної інформації про місцезнаходження для навігаційних задач. У той же час він уникає потреби в незалежній службі визначення місцеположення, інтегруючи поширення інформації про

місцезнаходження в протокол реактивної маршрутизації. Крім того, реактивні та географічні компоненти методу можуть бути додатково покращені, використовуючи інформацію про місцезнаходження новими способами. За допомогою флуду запитами на маршрут (route request flooding) і прогнозування мобільності, щоб підвищити продуктивність основного протоколу RGR. На додаток до інформації про місцезнаходження, цей механізм використовує вектор швидкості вузлів для прогнозування їх поточного розташування. На відміну від багатьох інших мобільних вузлів, траєкторії БПЛА менш схильні до різких змін, тому очікується, що використання вектора швидкості вузлів призведе до великої точності прогнозування мобільності. Тоді прогнозування мобільності дозволяє протоколу відстежувати стан реактивних маршрутів і вибирати відповідних сусідів під час фази GGF протоколу. У той же час використовуються два різних методи флуду (flooding), щоб зменшити кількість службових повідомлень, які генеруються оригінальним протоколом RGR під час фази виявлення маршруту, шляхом використання інформації про місцезнаходження.

3.2 Маршрутизація в мережах із БПЛА

В останні роки були спроби запропонувати протоколи маршрутизації для авіаційних мереж. У роботі [67] запропоновано механізм маршрутизації, заснований на доплерівському зсуві літальних апаратів, для аеронавігаційних спеціальних мереж (AANET). Коли інформація про місцезнаходження недоступна, доплерівський зсув використовується для оцінки відносної швидкості вузлів і для оцінки того, наближаються чи віддаляються вузли один від одного [68]. Ці значення доплерівського зсуву призводять до оцінки тривалості та стабільності зв'язку [67]. Коли доступна інформація про місцезнаходження, швидкість і поточне розташування вузлів використовуються як показники вартості для

оцінки стабільності лінії [69]. На відміну від комерційних літаків в AANET, які мають транспортні додатки, БПЛА в UAANET зазвичай використовуються для таких задач, як пошук або відстеження. Ці конкретні програми зазвичай накладають на БПЛА випадкову нелінійну траєкторію (наприклад, об'єкт стеження може мати непередбачувану нелінійну мобільність). Таким чином, псевдолінійність, яка призводить до специфічної стратегії проектування в AANET [69], не є можливим припущенням в UAANET.

Іншою категорією робіт з протоколами маршрутизації для авіаційних мереж є вирішення проблем обривів зв'язку в мережі [70]. Алгоритм географічної маршрутизації для періодично підключених MANET введено в [71]. Алгоритм маршрутизації LAROD (Location Aware Routing for Opportunistic Delay-tolerant networks), є алгоритмом маршрутизації без географічних маяків, заснованим на принципі Store-Carry-Forward. БПЛА, який утримує пакет (зберігач), використовує метод greedy packet forwarding, коли поруч є інші БПЛА. Зберігач повинен переконатися, що пакет був прийнятий іншими БПЛА. Якщо кілька вузлів у зоні пересилання отримують пакет, перший вузол таймера, термін дії якого закінчився, вибирається як наступний пересилач для повторної трансляції пакета. Отримавши підтвердження отримання пакету іншими БПЛА, зберігач видаляє пакет.

3.2. Реактивна маршрутизація

У реактивних протоколах маршрутизації вихідний вузол знаходить маршрут до місця призначення, надсилаючи велику кількість запитів про маршрут в мережу. Оскільки процес виконується на вимогу (on demand), виявлення маршруту накладає певну затримку на загальну продуктивність мережі. Крім того, флуд запитами про маршрут може спричинити переповнення буфера та перевантаження мережі. У цій роботі активна

частина запропонованої комбінованої маршрутизації базується на AODV [65]. Основною причиною вибору AODV є його популярність, хоча, крім AODV, можуть бути використані й інші альтернативи.

3.3 Географічна маршрутизація

Географічна маршрутизація використовує інформацію про місцезнаходження, а не адреси в мережі для встановлення зв'язку між відправником і приймачем в середовищі MANET. Кожен вузол у мережі знає про своє власне розташування, а інформація про розташування сусідніх вузлів збирається за допомогою періодичного обміну пакетами. Крім того, вихідний вузол знає місцезнаходження місця призначення пакету. Для розповсюдження даних вузол використовує механізм пожадливого пересилання (greedy forwarding), в якому використовується традиційне геометричне правило, яке зазвичай базується на теоремі Піфагора. Вузол-джерело надсилає пакети даних сусідові з мінімальною відстанню до місця призначення [72].

Служби локації, які є модулем для надання інформації про місцезнаходження вузлам у мережі, можна класифікувати на три великі групи: на основі флуду (перенасичення), на основі кворуму, домашня [73]. Служба на основі флуду (перенасичення) є традиційною, яка може бути проактивною або реактивною. У проактивній службі вузол періодично розповсюджує своє місцезнаходження. У активній службі, коли вузол не має оновленої інформації про пункт-призначення, в мережу надсилаються пошукові повідомлення. Інформацію про місцезнаходження та мобільність можна використовувати, щоб звузити масштаби розсилки запитів. У підходах на основі кворуму кінцевий вузол надсилає інформацію про оновлення розташування, а вихідний вузол відповідає за надсилання пошукових запитів. Оновлення інформації про місцезнаходження та пошукові оновлення зазвичай надсилаються до двох різних підмножин

мережевих вузлів, які відповідно називаються кворумом оновлення та кворумом пошуку. Ці дві підмножини слід вибрати таким чином, щоб їх перетин не був порожнім. У точках зустрічі кворуми оновлення та пошуку можуть надати інформацію про місцезнаходження вузлам, що запитують. Нарешті, у домашньому підході кожен вузол має домашній регіон, який відомий іншим вузлам, і оновлення інформації про місцезнаходження проактивно надсилається вузлам, які належать або є найближчими до цього регіону. Інші вузли надсилають пошукові повідомлення до домашнього регіону призначення. Якщо потрібно, повідомлення перенаправляється з домашнього регіону до поточного розташування вузла.

3.4 Реактивно-географічна комбінація

Різні варіанти комбінованої реактивно-географічної маршрутизації вже були запропоновані в літературі для кількох різних цілей. У [74] AODV використовується на етапі встановлення з'єднання, а проактивна маршрутизація з спрямованим пересиланням використовується під час фази передачі даних. Коли автори інтегрують характеристики маршрутизації по вимозі (on demand) та проактивної маршрутизації, запропонований механізм забезпечує кращий коефіцієнт доставки. Однак продуктивність протоколу з точки зору затримки не оцінюється. Крім того, сценарій мобільності несумісний з задачами UAANET.

Для вирішення проблем з втратою пакетів при географічній маршрутизації в межах регіонів з поганим покриттям та радіо умовами в mesh мережах у [75] запропоновано реактивний механізм зворотного відстеження для інформування верхніх вузлів про заблоковані сектори. Іншу комбінацію протоколів реактивної та географічної маршрутизації можна знайти в [76]. У цьому алгоритмі використовується механізм реактивної маршрутизації для зменшення кількості контрольних пакетів

для виявлення маршрутизації. Запропонований метод показує покращення витрат на маршрутизацію порівняно з Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [72] в сенсорних мережах.

В данній варіації метод RGR призначений для вирішення проблем високої мобільності вузлів в UAANET. Фактично, GGF використовується як альтернатива реактивної маршрутизації для розповсюдження даних. На відміну від раніше введених комбінацій, у цій статті як реактивна, так і GGF частини використовуються для поширення даних. Крім того, реактивна частина використовується для отримання інформації про місцезнаходження вузла призначення, не вимагаючи окремої служби визначення місця розташування. Незважаючи на те, що ідея об'єднання реактивного механізму з GGF запропонована в AODV з місцезнаходженням [77], реалістичного аналізу продуктивності або результатів моделювання його продуктивності не було. У цій статті надано детальний опис реалізації алгоритму та експериментально досліджено його продуктивність щодо коефіцієнта доставки пакетів (PDR), затримки та накладних витрат.

3.5 Протокол на базі масштабного флуду (Scoped flooding)

Маршрутизація з визначенням розташування (LAR) [17] є однією з найпопулярніших пропозицій щодо зменшення накладних повідомлень у AODV та динамічної вихідної маршрутизації (DSR) [65-66]. Оскільки географічна інформація про пункт призначення недоступна безпосередньо в AODV або DSR, LAR використовує оригінальний протокол AODV або DSR для встановлення з'єднання з вузлом призначення. Під час цієї фази вихідний вузол дізнається географічну інформацію про пункт призначення з повідомлення-відповіді маршруту, надісланого вузлом призначення, або проміжним вузлом, який знає останній маршрут до пункту призначення. З цією інформацією про місцезнаходження, LAR не потрібно передавати

пакет запиту маршруту у всю мережу. Це обмежує розповсюдження пакетів запиту маршруту (RREQ) тією частиною мережі, яка приблизно містить вузол призначення. Під час процесу виявлення маршруту кожен проміжний вузол порівнює власну інформацію про місцезнаходження із зазначеною областю пошуку, що міститься в пакеті RREQ. Якщо він належить до області пошуку, цей вузол повторно транслюватиме пакет RREQ. Інакше пакет RREQ буде відкинуто [79]. Тільки коли шляхи за межами області пошуку LAR можуть досягти місця призначення, LAR повернеться до заповнення RREQ. У LAR географічна інформація використовується лише для визначення області поширення повідомлення запиту на маршрут і не використовується для вирішення питання про пересилання пакетів даних. У нашій роботі ми приймаємо подібну стратегію та обговоримо і порівняємо два підходи до визначення області пошуку

3.6 Протокол на основі прогнозування мобільності

Були запропоновані різні версії протоколів маршрутизації на вимогу (on demand), засновані на прогнозуванні мобільності [80-83]. Більшість із цих протоколів зосереджені на виборі найбільш стабільного маршруту з уже відомих зворотних маршрутів. Ці зворотні маршрути встановлюються, коли вузол призначення отримує повідомлення RREQ від різних сусідніх вузлів. У [80] час завершення зв'язку (LET) між будь-якими мобільними вузлами був використаний для покращення різних протоколів одноадресної та багатоадресної маршрутизації. За допомогою контрейлерної інформації про місцезнаходження контрольних пакетів їхній протокол оцінює LET між будь-якими двома вузлами та додає його до повідомлення RREQ. Проміжний вузол буде транслювати це повідомлення RREQ всім сусідам. При отриманні повідомлень RREQ вузол призначення дізнається LET всіх відомих маршрутів зв'язку і

вирішить, який маршрут зв'язку має максимальний час закінчення маршруту, який визначається як найменше за значенням LET одного посилання. Використовуючи час закінчення маршруту, можна налаштувати більш стабільний маршрут для передачі даних.

Алгоритм прогнозування мобільності для вдосконалення протоколів маршрутизації (MPRP), запропонований в [81], використовується для прогнозування стану зв'язку під час фази передачі даних. У цьому протоколі інформація про місцезнаходження включається в пакет даних. Під час передачі даних проміжний вузол може витягти інформацію про розташування попереднього вузла з пакета даних. Вузол порівнює різницю відстаней між двома послідовними отриманими пакетами даних, щоб визначити, коли зв'язок розірветься, і знайти непотрібні вузли на маршруті, які знаходяться занадто близько до поточного вузла. Найближчий вузол слід замінити вузлом, на відстані двох стрибків, як наступний крок передачі повідомлення. Цей метод мобільного прогнозування простий і не вимагає складних обчислень і пакетів міток. Однак цей механізм повинен додати таблицю передбачення до протоколу на вимогу (on demand) і використовувати нове повідомлення, яке називається повідомленням про закінчення терміну дії, для зворотного зв'язку про стан зв'язку до попереднього вузла. У нашій роботі ми додали аналогічну можливість до RGR, але уникнули потреби в повідомленні нового протоколу

3.7 RGR протокол

Основна ідея RGR, яка спочатку була запропонована в [84], полягає в поєднанні реактивного протоколу (у даному випадку AODV) з GGF. У цьому протоколі, якщо немає дійсного маршруту для передачі пакетів даних, вихідний вузол пакетів даних починає процес виявлення маршруту (як у AODV), щоб знайти дійсний запис маршруту для досягнення вузла

призначення, методом флуду пакетів RREQ в мережу. Насправді реактивний маршрут встановлюється, коли вихідний вузол отримує пакет відповіді маршруту (RREP) від вузла призначення. Після встановлення маршруту пакетів даних, буферизовані у джерелі, можуть бути передані до місця призначення. Новизна в RGR полягає в тому, що інформація про розташування вузла призначення отримується кожним проміжним вузлом, коли пакет RREP поширюється назад до вихідного вузла. У процесі обслуговування маршруту, якщо проміжний вузол не може отримати три послідовних hello повідомлення, з'єднання вважається втраченим, і реактивний маршрут розривається. RGR скасовує реактивний маршрут і перемикається в режим GGF. У цьому режимі протокол надсилає пакети даних до сусіднього вузла, який є найближчим до вузла призначення (по суті, зберігаючи його). У той же час пакет помилки маршруту (RERR) буде надіслано назад до попереднього вузла, поки він не досягне вузла-джерела. Вузол джерела, якщо він має більше даних для передачі, ініціює новий процес виявлення маршруту, щоб встановити новий реактивний маршрут до пункту призначення. Пересилання пакетів через GGF триватиме до тих пір, поки пакет даних не досягне вузла призначення і не буде видалений проміжним вузлом через те, що параметр TTL досягає 0, або доки пожадливе пересилання (greedy forwarding) не вдасться знайти сусідній вузол ближче до пункту призначення. Подібно до інших протоколів географічної маршрутизації, RGR відстежує існування та розташування кожного сусіда, коли вузли періодично передають hello повідомлення раз на секунду, які містять ідентифікатор вузла та інформацію про місцезнаходження. Наступні підрозділи коротко описують різні аспекти RGR.

3.8 Контрольні повідомлення

У RGR існує чотири різні типи керуючих повідомлень: RREQ, RREP, RERR та hello повідомлення. Функціональність та розповсюдження кожного з цих повідомлень у RGR подібні до AODV, за винятком того факту, що RREQ, RREP та hello повідомлення несуть інформацію про місцезнаходження. RREQ несуть інформацію про місцезнаходження джерела, RREP несуть інформацію про місце призначення, а hello повідомлення містять інформацію про місцезнаходження сусіда. Інформація про розташування використовується для оновлення таблиць вузлів у проміжних вузлах.

3.9 Таблиці вузлів

Як важливий модуль для маршрутизації, запропонований протокол RGR використовує дві різні таблиці в кожному окремому вузлі: таблицю маршрутизації та таблицю сусідів. Таблиця маршрутизації, індексована IP-адресою призначення, містить інформацію про конкретне призначення, включаючи місце призначення, отримане під час процесу виявлення маршруту. Таблиця сусідів містить всіх сусідів в межах одного кроку і містить інформацію про розташування кожного сусіда, отриману та оновлену за допомогою періодичних hello повідомлень.

3.10 Перехід на Greedy Geographic Forwarding

Перехід на GGF може відбуватися в проміжних вузлах, коли реактивний маршрут до пункту призначення обривається. Як показано в алгоритмі 1, коли надходить пакет даних, вузол перевіряє, чи існує реактивний шлях у його таблиці маршрутизації. Якщо маршрут не є дійсним (через переміщення сусідів), RGR виконує іншу функцію, в якій вузол намагається географічно переслати пакет до місця призначення.

Інформація про розташування місця призначення та сусіднього вузла, витягнута з таблиці маршрутизації та сусідньої таблиці відповідно.

3.11 Обробка отриманого пакета

Коли вузол отримує пакет даних через пожадликий географічний пересилач greedy geographic forwarder, він перевіряє, чи існує дійсний реактивний маршрут в його таблиці маршрутизації. Якщо реактивний маршрут існує і є дійсним, пакет буде переслано наступному сусіду на цьому маршруті. Якщо в таблиці маршрутизації є запис, що вказує на пункт призначення, але наступний сусід не доступний у таблиці вузлів, вузол звернеться до таблиці сусідів, щоб визначити найближчого сусіда до місця призначення. Якщо не вдається знайти сусідній вузол, який знаходиться ближче до місця призначення, пакет відкидається.

3.12 Взаємодія в вузлах призначення

Таблиця 3.1

Параметр	Реактивна маршрутизація	Географічна маршрутизація	RGR
Служба позиціонування	-	Необхідна	-
Запит маршруту	Необхідний	-	Необхідний
Розташування сусіднього вузла	-	Небхідне	Небхідне
Контрольні повідомлення	Встановлення маршруту / відстеження сусідів	Відстеження сусідів	Встановлення маршруту / відстеження сусідів
Прийняття рішення про маршрут	На основі джерела та проміжних вузлів	На основі проміжних вузлів	На основі джерела та проміжних вузлів
Мобільність	Статична / низька мобільність	Низька / висока мобільність	Мобільність від статичної до високої

Вузол призначення може отримати пакет або через реактивний маршрут, або через GGF від сусіда. Пакет, отриманий через реактивний маршрут, може бути або від джерела, що має інформацію про шлях до вузла призначення, або від джерела без такого шляху. Останній випадок можливий лише тоді, коли десь на шляху між джерелом та вузлом призначення відбувся принаймні один перехід з реактивного на GGF. У будь-якому випадку вузол призначення доставляє пакет до програми, коли він розпізнає себе як кінцевий пункт призначення.

3.13 Огляд Reactive-Greedy-Reactive

Підводячи підсумок, ми якісно порівнюємо запропонований RGR та протоколи реактивної та географічної маршрутизації, як показано в таблиці 3.1. На відміну від протоколів географічної маршрутизації, в RGR не потрібна незалежна служба визначення місцезнаходження, оскільки інформація про місцезнаходження надається реактивним механізмом RREQ/RREP. Процес виявлення маршруту RGR дещо складніший і вимагає розповсюдження інформації про місцезнаходження в порівнянні з реактивними протоколами. Збільшені накладні витрати – це ціна, яку ми платимо за забезпечення наскрізного підключення для архітектури мережі з високою мобільністю зі змінною щільністю без необхідності незалежної служби географічного розташування. Крім того, RGR був розроблений для мереж з більш високою відносною мобільністю в порівнянні з більшістю MANET сценаріїв. Отже, очікується, що в мережі буде більше переривань маршруту в порівнянні з традиційними MANET. Перехід на GGF забезпечує найкращу альтернативу у випадках, коли відбувається переривання маршруту.

3.14 RGR з масштабним флудом (scoped flooding)

Оригінальний протокол RGR успадкував флуд RREQ пакетами на всю мережу під час процесу виявлення маршруту від AODV, при необхідності з використанням розширеної техніки кільцевого пошуку. Ця стратегія називається blind flooding. Незважаючи на те, що кількість БПЛА в мережі відносно невелика, blind flooding додає високі витрати на протокол, що може призвести до переповнення буфера та перевантаження мережі. Щоб зменшити кількість пакетів RREQ, у цьому розділі обговорюються два різних механізми флуду в RGR, які пізніше в цій роботі оцінюються за допомогою моделювання. Перший механізм полягає в наступному. Коли процес виявлення маршруту ініціюється вперше, вузол-джерело починає флуд RREQ пакетами у всю мережу і чекає RREP від вузла призначення. Коли пакети RREP прибувають до вузла-джерела, встановлюється дійсний реактивний маршрут, а тим часом вузол-джерело дізнається інформацію про місцезнаходження вузла призначення. Через короткий період часу може знадобитися виконання нового процесу виявлення маршруту для того самого вузла призначення через розрив маршруту, викликаний високодинамічною топологією наших сценаріїв UAANET. У цьому випадку, використовуючи раніше вивчену географічну інформацію про пункт призначення, вузол джерело обчислює відстань до пункту призначення і включає цю інформацію в пакет RREQ (а також свої знання про місцезнаходження пункту призначення). Цей новий пакет запиту транслюється на всі сусідні вузли. Отримавши пакет RREQ, сусідній вузол витягує значення відстані з пакета RREQ і перераховує власну відстань, щоб досягти вузла призначення. Якщо ця нова відстань менша за відстань від пакету RREQ, сусідній вузол замінює старе значення новим у пакеті RREQ і повторно транслює пакет своїм сусідам. Інакше цей пакет RREQ буде відкинуто. Цей процес триває до тих пір, поки пакет

RREQ не досягне вузла призначення, який потім відповідає через RREP, оновлюючи інформацію про своє місцезнаходження в процесі. Вузол джерела буде чекати, щоб отримати відповідь маршруту на RREQ з областю дії. Якщо географічна інформація застаріла, цей масштабний флуд може завершитися невдачею, і джерело видасть ще один RREQ після попередньо визначеного тайм-ауту, збільшуючи відстань джерело-призначення на фіксований відсоток. У нашій реалізації ми використовували збільшення на 20% для кожного повторного RREQ. RREQ містить лічильник повторень, що дозволяє проміжним вузлам аналогічним чином застосовувати збільшену відстань до місця призначення з кожним повтором. По суті, це забезпечує додаткову затримку поширенні RREQ повідомлень. Після певної кількості повторних спроб, скажімо, п'яти, вихідний вузол переключиться з масштабного флуду (scored flooding) на сліпий флуд (blind flooding). Другий механізм залежить від того факту, що не тільки вихідний вузол, але й інші вузли мережі дізнаються місце призначення в RGR. Коли розкриття маршруту ініціюється вперше, вузол джерела встановлює відстань до місця призначення на нуль і додає це до пакету RREQ. Після цього вихідний вузол передає пакет RREQ всім сусідам. Кожен сусід, який отримує пакет RREQ, спочатку перевіряє, чи є в нього географічна інформація, пов'язана з вузлом призначення. Коли вузол не знає місця призначення, він повторно транслює пакет RREQ. В іншому випадку проміжний вузол обчислює власну відстань до вузла призначення і порівнює її зі значенням відстані в пакеті RREQ. Якщо значення відстані, витягнуте з RREQ, дорівнює нулю, тобто попередній вузол не знає місця призначення, проміжний вузол включає розраховану відстань до пакета RREQ і повторно транслює його. Якщо значення відстані, витягнуте з RREQ, відмінне від нуля, проміжний вузол порівнює це значення відстані зі своєю відстанню до пункту призначення, як згадувалося раніше. Якщо значення відстані вузла менше

за значення відстані від RREQ, значення відстані RREQ буде оновлено, а RREQ повторно транслюватиметься. В іншому випадку проміжний вузол скидає пакет RREQ. Цей процес повторюється, поки пакет RREQ не досягне місця призначення. Якщо припустити, що жоден вузол у всій мережі не знає географічного розташування місця призначення, цей механізм деградує до сліпого флуду (blind flooding). З іншого боку, на відміну від першої ідеї, нам не обов'язково вдаватися до сліпого флуду під час першого запиту маршруту. Якщо вузол-джерело використовує неточну інформацію про місцезнаходження, ця ітерація флуду також може не впоратись. У цьому випадку джерело повторно видасть RREQ з дистанцією 0 після невдалого очікування RREQ.

3.15 RGR з прогнозуванням мобільності

Відповідно до протоколу RGR, пакети даних надсилаються до вузла призначення, як тільки буде встановлений реактивний маршрут. Під час передачі проміжні вузли визначають статус наступного кроку, отримуючи hello повідомлення. Якщо проміжному вузлу не вдається отримати три послідовні hello повідомлення від наступного вузла на маршруті, цей проміжний вузол робить висновок, що зв'язок для досягнення наступного кроку розривається. У цей час дані будуть альтернативно пересилатися механізмом GGF. Враховуючи, що hello повідомлення транслюються раз на секунду, цей механізм затримує виявлення розриву посилання на 2-3 секунди. Коли зв'язок розривається, проміжний вузол не може отримати доступ до поточного стану зв'язку негайно і повинен чекати (у гіршому випадку до 3 секунд або трьох hello інтервалів), перш ніж він зможе діяти. Протягом цього часу проміжний вузол все ще припускає, що посилання дійсне, і продовжує пересилати пакети даних через (помилково) існуючий реактивний маршрут. В результаті ці пакети даних будуть втрачені і не можуть бути врятовані GGF-механізмом.

Зауважте, що ми можемо встановити для критеріїв розриву каналу зв'язку інше число, наприклад одне пропущене hello повідомлення. Хоча це зменшить час, необхідний для виявлення фактичного розриву каналу, це також призведе до багатьох неправильних повідомлень RERR, оскільки hello повідомлення, які транслюються в бездротових носіях, можуть бути втрачені через перешкоди або зіткнення. Як альтернатива, ми можемо зменшити інтервал hello повідомлень; але коли кожен вузол періодично передає hello повідомлення, це суттєво збільшує накладні витрати на повідомлення протоколу. Щоб вирішити цю проблему, запропонований механізм прогнозування мобільності, який використовує вектор швидкості, що пов'язаний з міткою часу вузла наступного кроку, щоб обчислити відстань між поточним вузлом і наступним вузлом кроку перед пересиланням пакетів даних (що є частиною періодичного hello повідомлення). Як тільки вузол наступного кроку виходить за межі діапазону передачі, поточний вузол передачі може негайно відповісти, скасувавши статус реактивного маршруту, і водночас переключитися на GGF, щоб врятувати пакети даних, які в іншому випадку були б відкинута.

Функціональність та розповсюдження контрольних повідомлень подібні до RGR, за винятком того, що RREQ, RREP та hello повідомлення містять більше інформації. У процесі виявлення маршруту повідомлення RREQ і RREP несуть не тільки інформацію про місцезнаходження вузла призначення, але також швидкість, напрямок і мітку часу попереднього вузла. У процесі обслуговування маршруту hello повідомлення періодично передають сусіднім вузлам інформацію, включаючи місцезнаходження, швидкість, напрямок і час. Ці параметри витягуються з цих повідомлень і записуються в кожному проміжному вузлі.

Після процесу виявлення маршруту вузол джерело посиляє буферизовані пакети даних до вузла призначення. Кожен проміжний вузол передає пакети даних один за іншим. На відміну від RGR, поточний вузол,

який збирається передати пакет, спочатку перевіряє відстань до наступного вузла. За допомогою рівнянь (3.1) і (3.2) поточний вузол оцінює в поточний момент положення наступного кроку (зверніть увагу, що для простоти ми виражаємо це в двовимірній системі координат, але це було б відносно просто, хоча і більш складно, щоб виразити ці співвідношення також у тривимірній системі координат).

$$X_{predict} = X_{next} + V \cos(\theta)(current_time - timestamp) \quad (3.1)$$

$$Y_{predict} = Y_{next} + V \sin(\theta)(current_time - timestamp) \quad (3.2)$$

У попередніх рівняннях $X_{predict}$ і $Y_{predict}$ — координати X і Y передбачуваного розташування наступного кроку. X_{next} і Y_{next} — останнє відоме розташування наступного вузла. Позначка часу записує час, коли було записане останнє відоме місцезнаходження. Параметри V і θ представляють швидкість і напрямок наступного вузла на маршруті відповідно. Ці необхідні параметри витягуються з таблиці маршрутизації, яка підтримується в поточному вузлі. Коли ми використовуємо рівняння (3), поточний вузол судить про те, чи не передається наступний крок. в режимі реального часу.

$$D_{next} = \sqrt{(X_{own} - X_{predict})^2 + (Y_{own} - Y_{predict})^2} \quad (3.3)$$

У рівнянні (3.3) D_{next} є фактичною відстанню від поточного вузла до наступного вузла переходу. X_{own} і Y_{own} — поточне розташування вузла. $X_{predict}$ і $Y_{predict}$ — координати X і Y , отримані з рівнянь (3.1) і (3.2).

Якщо D_{next} менше діапазону передачі, поточний вузол продовжує передавати пакети даних до наступного кроку, використовуючи реактивний маршрут. Однак, якщо відстань більше, ніж діапазон передачі (тобто наступний крок на реактивному маршруті зараз прогнозується як поза діапазоном), поточний вузол негайно припиняє надсилання пакетів

даних за цим маршрутом і одночасно перемикається на GGF для пересилання пакетів даних. Під час фази GGF поточний вузол отримує топологію сусідів у реальному часі, використовуючи той самий метод передбачення мобільності. Потім він вибирає вузол, найближчий до місця призначення, щоб пожадливо пересилати (greedy forward) пакети до нього.

Необхідно зауважити, що прогнозування мобільності вимагає, щоб вузли були принаймні приблизно синхронізовані по часу. Якщо ми припустимо, що максимальна швидкість руху 300 км/год (що еквівалентно 1080 м/с) для БПЛА, помилки синхронізації годинника в 1 мс перетворюються на помилку в прогнозованому місцезнаходженні щонайменше 1,08 м, якщо два БПЛА рухаються в протилежних напрямках, дуже мала частка типових діапазонів передачі. Така точність синхронізації легко досягається за допомогою одного з багатьох протоколів синхронізації годинника, запропонованих у літературі [85, 86]. Крім того, якщо БПЛА отримують інформацію про своє місцезнаходження для цілей навігації за допомогою GPS, інші вузли також будуть точно синхронізовані з високою точністю, що позбавляє потреби в окремому протоколі синхронізації годинника.

Оскільки GGF використовується як резервний механізм, пакет RERR не потрібно генерувати негайно, коли проміжний вузол виявляє, що зв'язок з вузлом наступного переходу розривається. Тому ми затримуємо передачу повідомлення RERR після виявлення розриву зв'язку на 3.5 секунди, значення, яке перевищує найдовшу затримку для AODV та оригінального RGR для виявлення розриву посилання (3 секунди або, як варіант, три послідовні hello інтервали). Чисто реактивний протокол маршрутизації, такий як AODV, повинен якнайшвидше відновити новий маршрут, щоб запобігти довгим перервам у передачі пакетів даних. Протягом цього періоду в RGR пакети даних можуть бути врятовані через

GGF. Фактично, попереднє дослідження показало, що для невеликої кількості кроків GGF має високу ймовірність успіху досягти пункту призначення [87]. Поки не буде встановлено новий реактивний маршрут, проміжний вузол може продовжувати надсилати пакети даних сусідньому вузлу, який є найближчим до вузла призначення. У високодинамічних топологіях, ретельно вибираючи відповідну затримку повідомлення RERR, ми очікуємо, що це зменшить загальну кількість RREQ ініційованих джерелом без впливу на загальну продуктивність протоколу.

3.16. Оцінювання Reactive-Greedy-Reactive

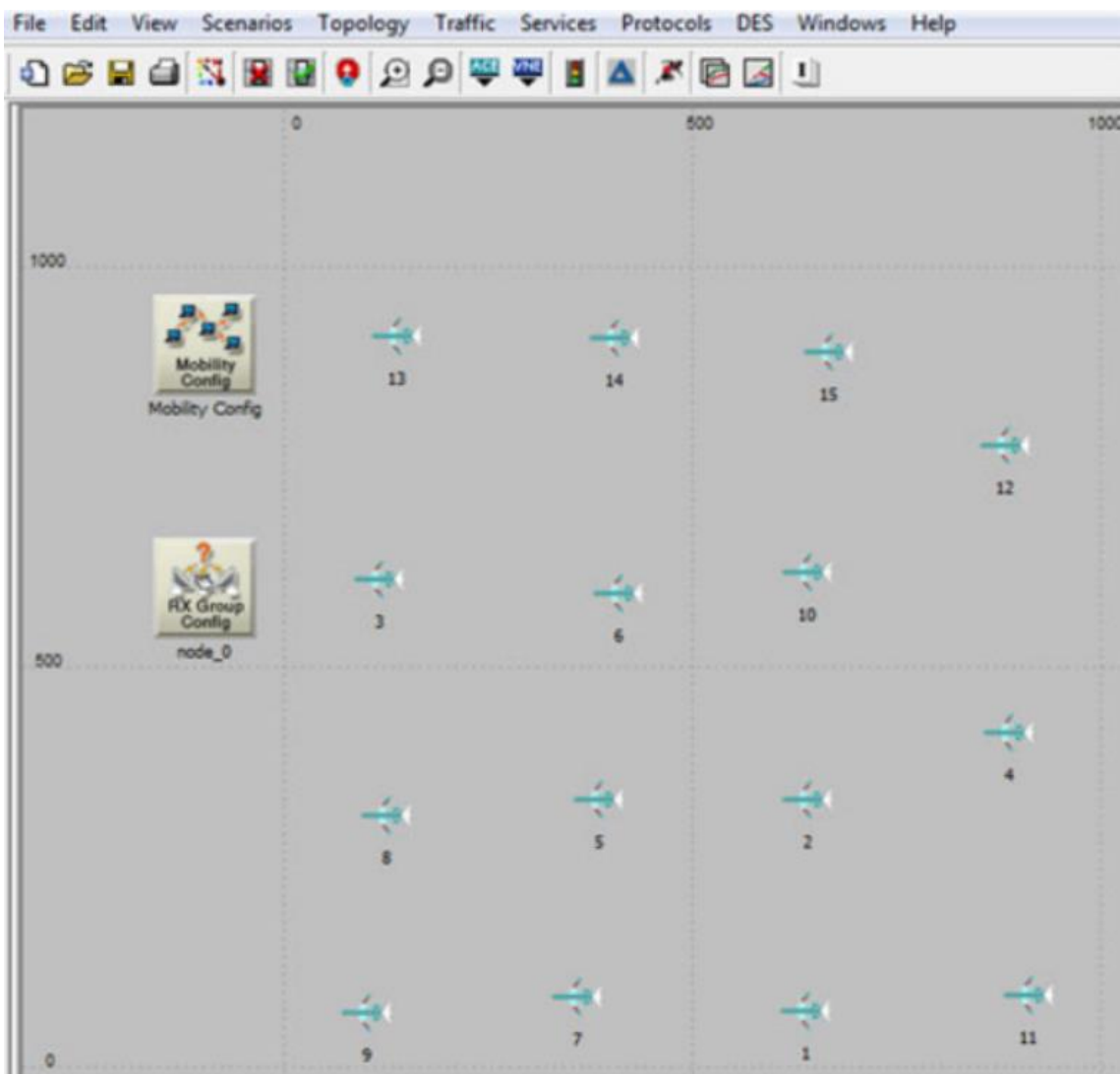


Рис 3.1 Сценарій моделювання

Для оцінки продуктивності RGR був використаний OPNETModeler 16.0 [88]. У OPNET модульний доступ до різних мережевих компонентів дає змогу розробити протокол, незалежний від інших модулів у мережі. Іншою мотивацією для використання OPNET було те, що AODV вже реалізований там.

Щоб оцінити продуктивність RGR із запропонованими удосконаленнями, ми створили специфічний сценарій, за яким 15 БПЛА розподіляються випадковим чином у початковій області, як показано на рисунку 3.1. Модель поширення втрат на вільний шлях розглядається в моделюванні. Кожен БПЛА у сценарії випадково вибирає інший БПЛА як мету для відправки пакетів даних. Розміри пакетів визначаються з експоненціального розподілу із середнім значенням 1024 біта. Затримки між пакетами мають експоненційний розподіл з середнім значенням 0,2 секунди. Причина такої структури потоку трафіку полягає в тому, що адаптивність запропонованого модифікованого протоколу RGR для обробки багатьох потоків може бути перевірена. Здатність обробляти багато потоків є важливою характеристикою протоколу маршрутизації [1]. Таким чином, цей сценарій можна розглядати як відносно реалістичний сценарій багатотрафікових потоків для UAANET.

Модель випадкової точки маршруту (RWP) використовується для імітації реалістичної мобільності БПЛА для пошукової місії. Під час пошукової місії кожен БПЛА шукає об'єкт у певній зоні. Оскільки кожен БПЛА повинен рухатися безперервно без паузи, час паузи в моделі для кожного вузла встановлюється на 0. Щоб змодельовати сценарій високої мобільності, ми вибираємо швидкість для кожного БПЛА для рівномірного розподілу між 50 і 60 м/с [89]. RWP не моделює належний опис мобільності БПЛА, оскільки він допускає дуже різкі та грубі зміни траєкторії БПЛА, але це достатньо для симуляції зміни місцеположення БПЛА. Як обговорювалося раніше, більш реалістичні траєкторії БПЛА

також є більш передбачуваними. Тому представлені тут результати недооцінюють приріст продуктивності, якого може досягти прогнозуванням мобільності. Дальність передачі кожного БПЛА встановлена на 1000 м, а час моделювання — 1000 с. На початковій фазі (як показано на рисунку 3.1) всі БПЛА знаходяться поруч один з одним. Таким чином, показник початкової продуктивності мережі буде високим, незалежно від будь-якого протоколу маршрутизації. Оскільки БПЛА поступово поширюються по області пошуку під час симуляції, продуктивність з точки зору PDR, накладних витрат та затримки погіршиться і в кінцевому підсумку досягне стабільного режиму. Важливо зазначити, що ми не змушуємо БПЛА перебувати поруч один з одним. Це означає, що в певний момент часу мережа може бути відключена, як це відбувається в реалістичних програмах UAANET. Специфічні параметри мобільності наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Параметр	Значення
Швидкість	в межах 50-60 м/с
Початковий регіон	1x1 км ²
Регіон пошуку	2 x 4 км ²
Кількість БПЛА	15
Дальність передачі	1000 м
Час симуляції	1000 с

3.17 Результати симуляції

Для моделювання 10 різних початкових значень генератор псевдовипадкових чисел встановлюється в OPNET, так що кожен набір результатів моделювання буде незалежним. П'ять протоколів – AODV,

оригінальний RGR, RGR з прогнозуванням мобільності (MPRGR), RGR з методом масштабного флуду 1 і прогнозуванням мобільності (SF1MPRGR) – і RGR з методом масштабного флуду 2 і прогнозуванням мобільності (SF2MPRGR) моделюються окремо та порівнюються один з одним.

На наступних малюнках продуктивність вищезгаданих п'яти протоколів порівнюється один з одним за допомогою таких показників: PDR, накладні витрати протоколу (вимірюються контрольні пакети, що передаються в секунду) і затримка від кінця до кінця.

Як видно з рисунку 3.2, MPRGR має найвищий PDR серед п'яти протоколів, досягаючи приблизно 83%. Два протоколи, засновані на флуді, мають майже подібні результати з дуже незначною деградацією порівняно з MPRGR. Тим часом оригінальні RGR і AODV працюють набагато гірше, ніж інші три протоколи. Їх продуктивність PDR падає до 80% і 76% відповідно в стаціонарному режимі. Основною причиною пояснення цієї відмінності є те, що вихідний RGR і AODV не мають можливості перевірити стан зв'язку на реактивному маршруті в реальному часі. Виявлення статусу реактивного маршруту затримується до трьох інтервалів привітання. З іншого боку, інші три протоколи мають можливість виявляти стан реактивного маршруту під час передачі даних і перемикається на GGF відразу після розриву зв'язку. Таким чином, пакети, які скидаються оригінальними RGR і AODV (оскільки вони передаються через недійсні посилання), рятуються іншими трьома протоколами. Щоб визначити, чи є можливість для подальшого вдосконалення, було запущено моделювання, з сліпим флудом (blind flooding) пакетів даних, а не їх перенаправлення (forwarding). Хоча це використовує велику частку ресурсів мережі, тому не рекомендується взагалі, це допомагає встановити верхню межу продуктивності PDR протоколу маршрутизації. Як показують результати на рисунку 3.2, все ще існує нетривіальний

розрив навіть між нашим найкращим варіантом і флуд, що вказує на те, що є можливості для подальшого вдосконалення.

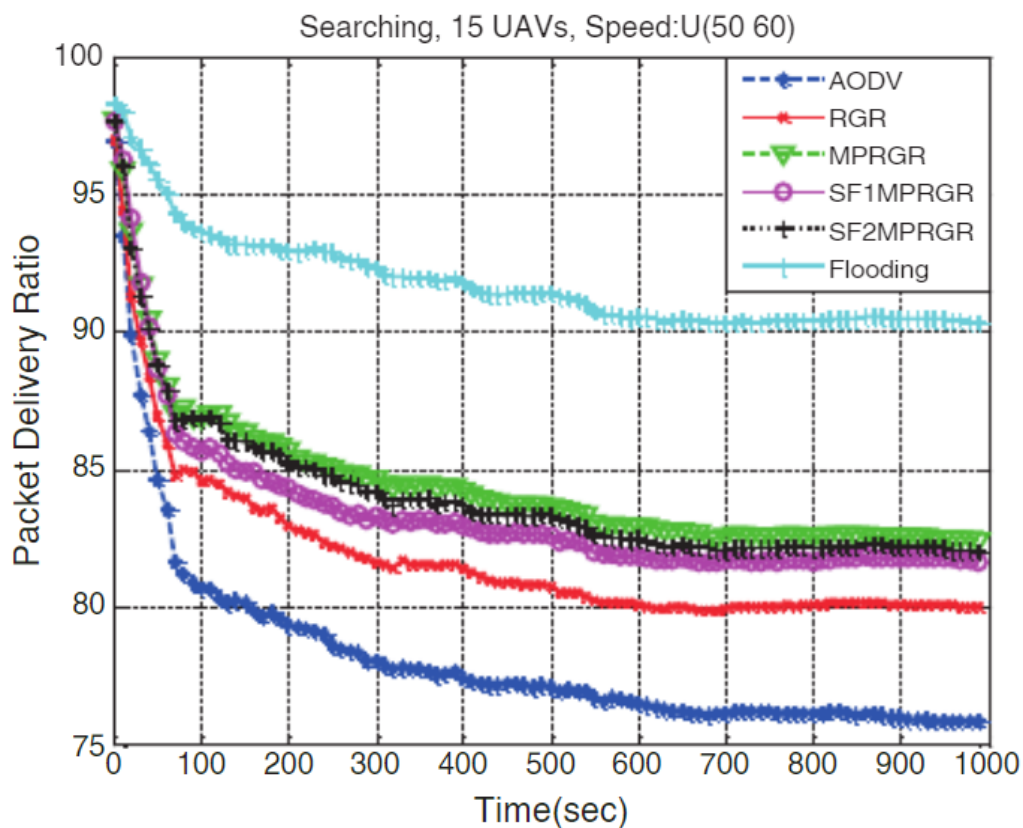


Рис. 3.2. PDR п'яти досліджуваних протоколів

На рисунку 3.3 ми бачимо, що два протоколи масштабованого флуду (scoped flooding) мають найнижчі накладні витрати на протокол, зменшуючи накладні витрати MPRGR з майже 21 пакета в секунду до 18 пакетів в секунду. Результати підтверджують, що обидва механізми масштабованого флуду зменшують кількість RREQ під час моделювання за рахунок успішного використання географічної інформації. Накладні витрати MPRGR приблизно на 3 пакети в секунду нижчі, ніж оригінальний RGR, і приблизно чотири пакети в секунду для AODV. MPRGR чекає 3.5 секунди, перш ніж відправити RERR назад до джерела, таким чином зменшуючи загальну кількість RREQ. Отже, кількість RREQ, ініційованих вихідним вузлом, зменшується, що призводить до зменшення накладних

витрат. Зауважте, що швидкість в 7 контрольних пакетів в секунду є нижньою межею накладних витрат протоколу, оскільки AODV і RGR генерують hello повідомлення лише тоді, коли вузли знаходяться на активному маршруті і не було останнього пакета RREQ.

Усі запропоновані вдосконалення, зокрема масштабований флуд (scoped flooding) та затримка RERR, спрямовані на зменшення кількості контрольних повідомлень протоколом, крім періодичних hello повідомлень. Таким чином, вони утворюють нижню межу накладних витрат керуючого повідомлення. Інтуїтивно, для 15 вузлів і інтервалу hello в 1 секунду ми очікуємо, що кількість hello пакетів в секунду буде приблизно 15, що вказує на те, що ми підійшли зовсім близько. Однак вузли генерують привітні повідомлення лише тоді, коли вони перебувають на реактивному маршруті, і не було оновленого пакета RREQ. Таким чином, фактична кількість hello повідомлень набагато менша, як показано на рисунку 3.3.

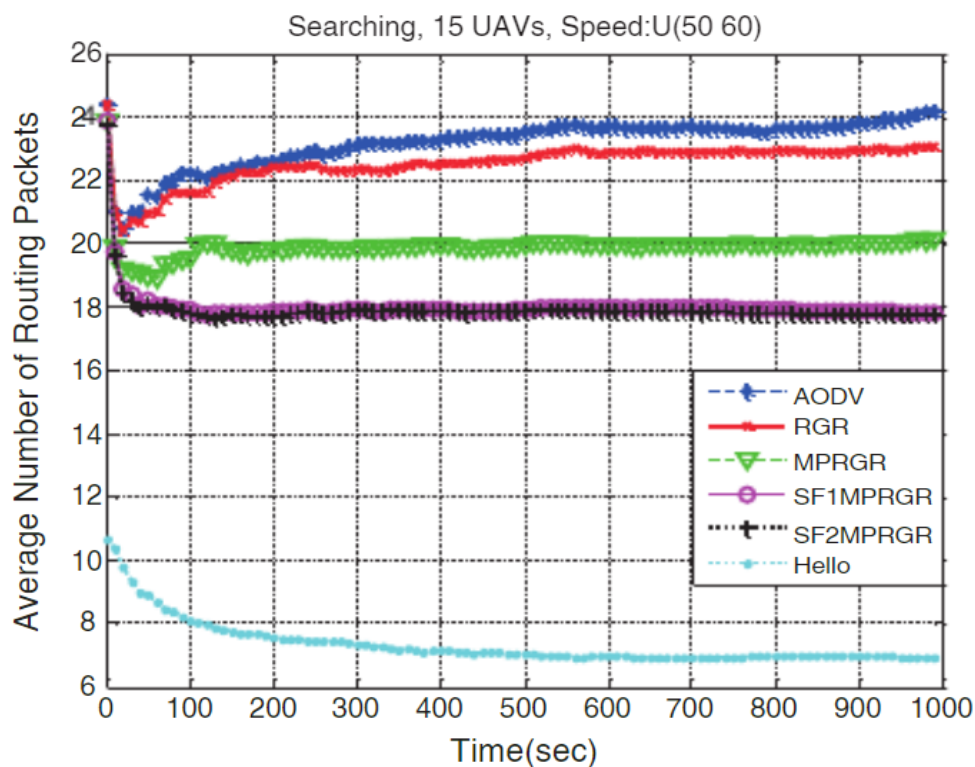


Рис. 3.3. Середній маршрутний трафік для досліджуваних протоколів

Ця кількість вказує на те, що є широкі можливості для подальших покращень. Також виникає проблема, що вузли можуть не знати про всі сусідні вузли, оскільки ті вузли, які не знаходяться на активному маршруті, не будуть надсилати hello повідомлення, що потенційно може негативно вплинути на GGF.

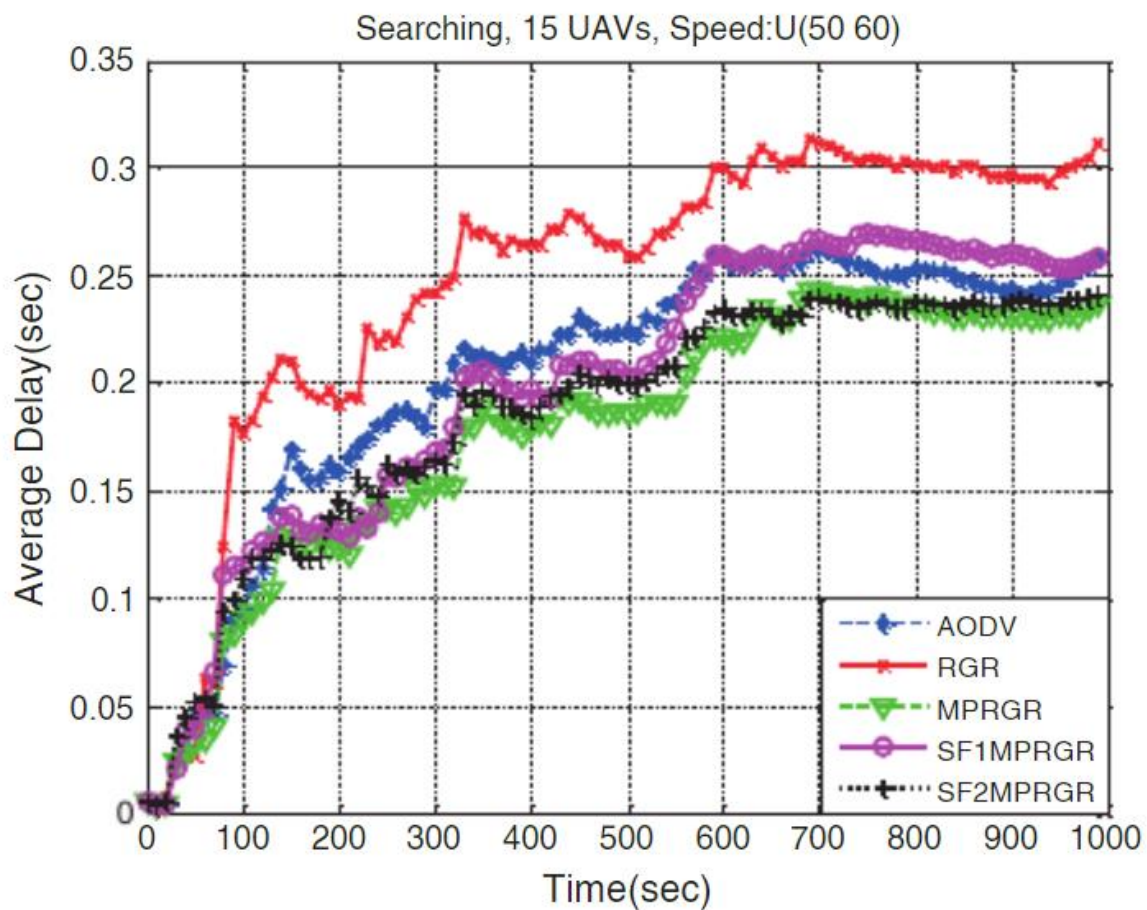


Рис. 3.4. Середня затримка пакетів для досліджуваних протоколів

З точки зору затримки доставки пакетів від джерела до вузла призначення, на рисунку 3.4 видно, що затримка для вихідного RGR є високою порівняно з іншими протоколами. Початкова затримка RGR становить близько 300 мс. Між тим, інші чотири протоколи мають подібну середню затримку (приблизно 250 мс) у стабільному стані. Це показує, що покращення в PDR і накладних витратах контрольних повідомлень не

коштують за рахунок затримки. Звичайно, скорочення керуючих повідомлень, що призводить до зменшення загального мережевого трафіку, приносить користь трьом новим запропонованим варіантам протоколу. Крім того, з розрахованою затримкою загальних отриманих пакетів, затримка, розрахована для AODV, дещо вводить в оману: розглядатимуться лише ті пакети, які доставлені по реактивному маршруту. Збереження пакетів загалом призведе до того, що ці пакети будуть доставлені через більшу кількість кроків, збільшення їх наскрізної затримки. Але ця (відносно невелика) додаткова затримка є невеликою ціною, яку потрібно заплатити за значне збільшення PDR.

Висновки

У цьому розділі було розглянуто протокол під назвою RGR як перспективний протокол маршрутизації в сценаріях високої мобільності та змінної щільності вузлів мережі. RGR поєднує особливості реактивних протоколів маршрутизації MANET, таких як AODV, з протоколами географічної маршрутизації, використовуючи унікальні характеристики UAANET. На додаток до поєднання реактивної та географічної маршрутизації, також було проаналізовано два покращення, а саме масштабний флуд (scoped flooding) та прогнозування мобільності. Результати моделювання показують, що флуд та прогнозування мобільності дають значно вищий PDR, менші накладні витрати та меншу наскрізну затримку в порівнянні з початковою затримкою протоколів RGR і AODV. З цих результатів можна зробити висновок, що дуже важливо перевіряти стан наступного вузла в режимі реального часу під час фази передачі даних, і обидва механізми передачі даних ефективні для придушення флуду (suppressing flooding) керуючих повідомлень RREQ.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

В даному розділі викладено опис стартап проекту в області аграрних систем відслідковування стану та догляду за врожаєм за допомогою FANET мережі з самоорганізацією із БПЛА.

4.1 Опис ідеї проекту

Проект направлений на розробку системи керування мереж БПЛА в області аграрного сектору. Суттєвою проблемою для таких мереж є автономність безпілотних дронів. Ідея проекту - оптимізація споживання запасу носіїв живлення, шляхом розробки нового методу маршрутизації для мереж такого типу.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка нового методу маршрутизації для мереж із самоорганізацією, побудованих на базі безпілотних дронів.	<ol style="list-style-type: none">1. Збільшення часу роботи мережевого вузла на одному заряді носія живлення.2. Зниження витрат на придбання та підтримку системи відслідковування стану врожаю для аграрних компаній.	Компанії, що займаються вирощуванням різноманітних культур на відкритих полях великої площі, що розташовані на різних відстанях один від одного будуть мати змогу отримувати актуальну інформацію про стан рослин, що дозволить збільшити ефективність роботи, підвищити об'єм врожаю за рахунок своєчасного догляду за полями.

При порівнянні з конкурентами в першу чергу увага надається зменшенню вартості закупки та обслуговування систем відстеження стану врожаю та підвищенню відмовостійкості вузлів мережі.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.2

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Метод маршрутизації для мереж із самоорганізацією, побудованих на базі безпілотних дронів.	Мова програмування JAVA	Існуючі бібліотеки, такі як Jakarta, RMI, JMS, що дозволяють створювати та використовувати існуючі патерни маршрутизації.	Є доступними і безкоштовними для використання
2		Мова програмування Python	Фреймворки та бібліотеки, що розроблені для серверної взаємодії з мережею (Netmiko, Telnetlib, Ipaddr)	Є доступними і безкоштовними для використання
Обрана технологія реалізації проекту: мова програмування Python				

Для реалізації проекту доступні дві мови програмування: Java та Python.

Python використовується для налаштування клієнт-серверної взаємодії між вузлами мережі.

Java надає можливості реалізувати багато маршрутних функцій на рівні додатків в вузлах мережі.

Для розробки оптимізованого методу маршрутизації стала мова програмування Python завдяки широкому набору інструментів для взаємодії з мережевими пакетами.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.3

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж	?
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги для стандартизації, специфікації	Немає

З урахуванням сьогоденних тенденцій ринку, необхідність оптимізації та зменшення вартості аграрних систем є нагальною і за попереднім оцінюванням ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги до споживачів товару
1	Оптимізація часу роботи дрона від одного заряду носія живлення	Виробники дронів	Виробники дронів та компанії, що постачають послуги аналізу врожаю можуть вносити коригування через специфіку бази пристроїв в їх мережі.	<ul style="list-style-type: none"> ● Зміна програмного забезпечення вузлів мережі ● Можливість отримати початкові характеристики мережі.

Таблиця 4.6

Фактори загрози

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
	Відсутність нагальної потреби	При несумісності апаратного забезпечення мереж з новим програмним забезпеченням оптимізованої системи, компанії, що вже мають мережу дронів, через дороговизну закупки нового апаратного забезпечення не стануть змінювати вже наявну систему на нову.	Відсутність інтересу через відсутність коштів.

Продовження таблиці 4.6

	Відсутність можливостей для реалізації системи	Одним за найголовніший факторів є сумісність розробляємої системи з дронами, що виробляються компаніями-виробниками.	Компанії, що виробляють дрони будуть розробляти сумісне з новою апаратне забезпечення дронів тільки в тому випадку, якщо побачать фінансову або маркетингову перспективу у співпраці.
--	--	--	---

Таблиця 4.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Необхідність в зменшенні ціни обслуговування та збільшенні продуктивності системи відстеження стану врожаю	Для малих та середніх компаній в аграрній індустрії більшість з наявних на ринку пропозицій є надто дорогими та потребують великих людських ресурсів для контролю над мережею	Виникнення спрону для компаній-виробників дронів від аграрного сектору в виді потреби в більш оптимальних мережах.

Однак і можливістю і загрозою є первинна дороговизна покупки такої мережі для аграрного сектору, що заважає спрогнозувати потенційну економічну перевагу для клієнтів та постачальників даних послуг.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Динаміка галузі	Використання таких систем слідкуванням врожаю набирає обертів по всьому світу, зокрема в розвинених країнах, через дороговизну людських ресурсів.
2	Необхідність оптимізації існуючих та нових систем.	Через збільшення часу роботи та зменшення часу простою одного мережевого вузла з'являється можливість зменшити кількість необхідних вузлів в мережі
3	Післяпродажне обслуговування	Підтримка існуючих систем через оновлення програмного забезпечення

Висновки

В даному розділі був проведений маркетинговий аналіз перспектив розробки оптимізованого методу маршрутизації в мережах із самоорганізацією із ПБЛА, що використовуються в аграрному секторі для відстеження стану та обробки врожаю.

В результаті дослідження визначено, що існує можливість ринкової реалізації проекту завдяки наявності попиту на даний вид послуг та програмного забезпечення.

Одночасно і компанії-виробники апаратного забезпечення для таких систем і кінцеві клієнти цих компаній зацікавленні в оптимізації роботи систем відстеження, зниженню початкової вартості системи для клієнта, та зниженню вартості та необхідних ресурсів на обслуговування апаратного забезпечення.

Проведений аналіз підтверджує, що подальша реалізація проекту є доцільною.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У цій роботі досліджується проблема побудови відмовостійкої мережі з самоорганізацією із БПЛА. Головний фактор, що ускладнює вирішення цієї задачі - рухомість вузлів мережі. Вузли мережі постійно рухаються, змінюючи своє місце розташування і одночасно змінюють траєкторію руху. Саме тому побудова маршруту передачу пакетів від вузла відправника, до вузла отримувача є складною та комплексною задачею.

В результаті аналізу архітектури FANET мереж, та взаємодії мережевих вузлів визначені основні проблеми, що виникають внаслідок змінної динаміки топології мережі. За рахунок того, що FANET мережі можуть використовуватись в будь яких географічних та топографічних умовах немає можливості гарантувати постійне стабільне з'єднання між вузлами мережі. Причиною цього є різні чинники, такі як: особливості місцевості, що можуть створювати перешкоди для передачі сигналу між мережевими вузлами, відстань між вузлами зв'язку, що постійно змінюється одночасно за напрямком руху вузлів мережі відносно один одного. Іншими чинниками, що ускладнюють побудову маршруту є обмеженість в ресурсах вузлів зв'язку, таких як обчислювальна потужність, об'єм пам'яті носіїв даних, обмежена ємність носіїв живлення вузлів мережі.

Ці фактори вимагають застосування оптимального методу маршрутизації.

Проаналізовано таблично-орієнтовані методи маршрутизації (OSPF, ADV, WRP та інші). В результаті аналізу визначено, що такі методи показують високу ефективність в мережах з незначною динамікою мережевої топології, що часто відбувається в локальних мережах з малою відстанню між мережевими вузлами. В мережах з високою частотою змін

мережевої топології таблично-орієнтовані методи маршрутизації генерують та надсилають занадто велику кількість службової інформації.

Зондові методи маршрутизації (DSR, TORA, AODV та інші) вирішують цю проблему і можуть бути застосовані в мережах з середньою і високою динамікою мережевої топології. Але при нестабільному з'єднанні або втраті існуючого маршруту генерують надмірну кількість службової інформації, що негативно впливає на роботу всієї мережі, через створення великої кількості зондів-запитів.

В результаті подальших досліджень було виявлено, що найбільш оптимальними для побудови маршрутів в FANET мережах є гібридні методи маршрутизації (ZRP, RGR). Ключовою відмінністю таких методів є використання одночасно і таблиць маршрутизації, і зондових повідомлень, в залежності від відомої топології мережі та необхідності побудови маршруту до різних вузлів мережі, що можуть знаходитись як в одній, так і в різних маршрутних зонах.

Метод RGR використовує прогнозування мобільності вузлів мережі в реальному часі та динамічний механізм флуду RREQ пакетів для визначення та встановлення маршруту до точки призначення. За рахунок попереднього аналізу отримується попередня інформація про розташування та стан наступних вузлів на шляху до вузла призначення, що значно збільшує відношення вчасно доставлених пакетів та цілісність передачі даних до вузла призначення.

Методи SF1MPRGR і SF2MPRGR показали на 15% меншу кількість маршрутного трафіку за рахунок відсутності hello-пакетів, що надсилаються між вузлами. Метод RGR має на 20% вищий час середньої затримки пакетів, але цей недолік повністю компенсується головною перевагою – зниженим маршрутним трафіком в мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Дымарский Я.С., Крутикова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. — М.: НТЦ “Мобильные коммуникации”, 2003. — 384 с.

[2] Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. — М.: Эко-Трендз, 2003. - 288 с.

[3] Kahn R. Advances in Packet Radio Technology // Proc, of the IEEE. — 1978. - 66. — P. 1468-1496.

[4] Бунин С.Г, Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. — К.: Техніка, 1989. - 223 с.

[5] Эфремидес Э., Уизелтир Д.Э., Бейкер Д.Д. Вопросы проектирования надежных мобильных радиосетей, использующих методы передачи и приема сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // ТИИЭР. - 1987. - 75, № 1. - С. 68-90.

[6] Fifer W., Bruno F. The Low-Cost Packet Radio // Proc, of the IEEE - 1987. — 75 (1). - P. 33-42.

[7] Sharret IP. WIN-T-The Army's New Tactical Intranet // IEEE MILCOM. - 1999. - P. 45.04.01- 45.04.05.

[8] Шиллер Й. Мобильные коммуникации / Пер. с англ. — М.: Изд. дом “Вильямс”, 2002. - 384 с.

[9] Freebersyser J., Leiner B. A DoD Perspective on Mobile Ad Hoc Networks // Ad Hoc Networking. - 2001. - 25. - P. 147-152.

[10] Sass P. Communications Networks for the Force XXI Digitized Battlefield // ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications Journal. — 1999. — 4. — P 450—455.

[11] Міночкін А.І., Романюк В.А. Архітектура перспективної мобільної компоненти тактичних мереж зв'язку збройних сил України // 36. наук, праць. - К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2004. - № 5. — С. 107- 115.

[12] Жук О.В., Міночкін А.І., Романюк В.А. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // 36. наук, праць ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2007. - № 2. - С. 111-119.

[13] Илюшко В.М., Нарытник Т.Н. Система передачи данных на базе высотного беспилотного летательного аппарата (СПД Фаэтон) // Зв’язок. - 2004. — № 7. - С. 38-39.

[14] Минович А.И., Романюк В.А. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Там же. — 2004. — № 2. — С. 46—50.

[15] Sichert M.L. Wireless mesh networks: opportunities and challenges / Sichert M.L. // Proc, of the Wireless World Congress. - 2005. — P. 263—268.

[16] Akyildiz F., Wang X. A Survey on Wireless Mesh Networks // IEEE Communications Magazine. - 2005. - 43, N 9. - P. 412-418.

[17] Минович А.И., Романюк В.А. Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв’язок. — 2005. — № 2. — С. 53—58.

[18] Минович А.И., Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях — проблема и пути ее решения // Там же. — 2006. — № 3. - С. 42-50.

[19] Ramachandram K.N., Buddhikot M.M., Miller S. On design and implementation of infrastructure mesh networks // Proc, of WiMesh’05. - 2005. - P. 785-790.

[20] Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я. Аналіз методів управління навантаженням в мобільних радіомережах на транспортному рівні моделі OSI // 36. наук, праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. — 2006. - № 3. — С. 55-65.

[21] Минович А.И., Романюк В.А. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв’язок. - 2005. - № 8. - С. 17-23.

[22] Salem N.B., Hubaux J.-P. Securing Wireless Mesh Networks // IEEE

Wireless Communications. - 2006. - 13, N 2. - P. 625-631.

[23] Міночкін А.І., Романюк В.А., Шаціло П.В. Виявлення атак в мобільних радіомереж // 36. наук, праць ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2005. - № 1. - С. 102-111.

[24] Бунин С.Г, Миночкин А.И., Романюк В.А. Перспективы беспроводных ячеистых сетей // Зв’язок. — 2007. - № 5. - С. 20-24.

[25] Міночкін А.І., Романюк В.А. Методологія управління тактичними сенсорними мережами // IV Наук.-практ. конф. ВІТІ “Проблеми телекомунікацій”. — К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2008. — С. 15-26.

[26] Кучерявый Е.А., Винель А.В., Ярцев С.В. Особенности развития и текущие проблемы автомобильных сетей VANET // Электросвязь. — 2009. — № 1.— С. 24—28.

[27] Олифер В.Г. Компьютерные сети. — СПб.: Питер, 2000. — 672 с.

[28] Кульгин М. Технология корпоративных сетей. Энциклопедия. — СПб.: Питер, 2000. - 704 с.

[29] Мельников Д.А. Информационные процессы в компьютерных сетях. Протоколы, стандарты, интерфейсы, модели. — М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 1999. - 256 с.

[30] Шварц М. Сети связи: протоколы, проектирование и анализ / Пер. с англ. — М.: Наука, 1992. - 336 с.

[31] Дилип Н. Стандарты и протоколы Интернета / Пер. с англ. — М.: ТОО “Channel Trading Ltd ”, 1999. - 384 с.

[32] Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов. — М.: Радио и связь, 1986. — 408 с.

[33] Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. — Л.: Машиностроение, 1990. — 332 с.

[34] Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 544 с.

[35] Щербина Л.П. Основы теории сетей военной связи. — Л.: ВАС, 1989. — 178 с.

[36] Арипов М.Н. Контроль и управление в сетях передачи данных с коммутацией пакетов / Арипов М.Н., Присяжнюк С.П., Шарипов Р.А. — Ташкент: Фан, 1988. — 160 с.

[37] Шаров А.Н. Автоматизированные сети радиосвязи / Шаров А.Н. — Л.: ВАС, 1988. - 178 с.

[38] Куо Ф.Ф. Протоколы и методы управления в сетях передачи данных / Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1985. - 480 с.

[39] Джубин Д., Торноуд. Протоколы пакетной радиосети DARPA // ТИИЭР. — 1987. — 75, № 1. - С. 26-41

[40] Офіційний сайт Internet Engineering Task Force (IETF). Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter. — Режим доступу: <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>

[41] Шиллер Й. Мобильные коммуникации / Пер. с англ. - М.: Изд. дом “Вильямс”, 2002. - 384 с.

[42] Миночкин А.И., Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях — проблема и пути ее решения // Зв’язок. — 2006. - № 3. - С. 42—50.

[43] Романюк В.А. Постановка проблеми маршрутизації інформаційних потоків у мережах радіозв’язку з динамічною топологією // 36. наук, праць ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2003. — № 1. - С. 112-119.

[44] Миночкин А.И., Романюк В.А. Управление топологией в мобильных радиосетях // Зв’язок. — 2003. - № 2.

[45] Qayum A., Viennot L., Laoviti P. Optimized Link State Routing // Proc, of IEEE INMIC. — 2001. - P. 1120-1125.

[46] Perkins C.E., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // Comp. Commun. Rev. — 1994. — N 10. — P. 234—244.

[47] Романюк, В.А. Управление построением маршрутов для сети с динамической топологией // Управляющие системы и машины. — 1993. — № 2. — С. 81—86.

[48] Миночкин А.И., Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях // Сети и телекоммуникации. - 2002. — № 1. - С. 42—47.

[49] Красиловец Л.В., Романюк В.А. Проблемы управления сетями пакетной радиосвязи с промежуточным хранением информации и мобильными абонентами // Кибернетика и системный анализ. — 1996. — № 5.

[50] Johnson D.B., Maltz D.A. Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networks // Mobile Computing. - 1996. — P. 153-181.

[51] Perkins C.E., Royer E.M. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing // Proc, of IEEE WMCSA'99. - 1999. - P. 90-100.

[52] Toh C.-K. A Novel Distributed Routing Protocol To Support Ad-Hoc Mobile Computing // Proc. IEEE Annual Int. Phoenix Conference Computer and Communications. — 1996. — N 3. — P. 480-486.

[53] Dube R. Signal Stability Based Adaptive Routing (SSA) for Ad-Hoc Mobile Networks // IEEE Personal Communication. - 1997. — N 2. — P. 36-45.

[54] Park V., Corson M.S. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks// Proc. IEEE INFOCOM'97. - 1997. - N 4. - P. 451-458.

[55] Миночкин А.И., Романюк В.А., Скрыпник Л.В. Способы повышения эффективности функционирования зондовой маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2003. — № 6. - С. 46-49.

[56] Міночкін А.І., Романюк В.А. Імітаційне моделювання методів маршрутизації, які застосовуються в автоматизованих мережах радіозв'язку // 36. наук, праць. — К.: КВІУЗ. — 2001. - № 1. - С. 95-102.

[57] Broch J., Maltz D.A., Johnson D.B, Hu Y.-C., Jetcheva J. A

Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols // Proc. ACM/IEEE MOBICOM. - 1998. - P. 85-97.

[58] Perkins C.E., Royer E.M., Das S.M. Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks // IEEE Personal Computer. — 2001. — 8, N 2. - P. 16—28.

[59] Lee S., Gerlof M. A Simulation Study of Table-Driven and On-Demand Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Network. - 1999. — 13, N 4. — P. 48—54.

[60] Романюк В.А. R-зоновий метод маршрутизації в автоматизованих мережах радіозв'язку // ІІ 36. наук, праць. - 2001, № 3. — С. 182-186.

[61] Романюк В.А. Групповая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2001. - № 6. - С. 36-41.

[62] Frew E, Brown T. Airborne communication networks for small unmanned aircraft systems. Proceedings of the IEEE 2008; 96(12): 2008–2027.

[63] Shirani R, St-Hilaire M, Kunz T, Zhou Y, Li J, Lamont L. Quadratic estimation of success probability of greedy geographic forwarding in unmanned aeronautical ad-hoc networks, In IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC2012-Spring), Yokohama, Japan, May 2012; 1–5.

[64] Clausen T, Jacque P. Optimized link state routing protocol, IETF RFC 3626, October 2003.

[65] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing, IETF RFC3561, July 2003.

[66] Johnson D, Hu Y, Maltz D. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for ipv4, IETF RFC 4728, February 2011.

[67] Sakhaee E, Jamalipour A, Kato N. Aeronautical ad-hoc networks. In IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006), Vol.1: Las Vegas, NV, 2006; 246–251.

[68] Sakhaee E, Jamalipour A. Stable clustering and communications in

pseudolinear highly mobile ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2008; 57(6): 3769–3777.

[69] Sakhaee E, Jamalipour A. The global in-flight internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2006; 24(9): 1748–1757.

[70] Kuiper E, Nadjm-Tehrani S. Geographical routing in intermittently connected ad hoc networks, In *Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications – Workshops (AINAW 2008)*, Okinawa, 2008;1690–1695.

[71] Kuiper E, Nadjm-Tehrani S. Mobility models for UAV group reconnaissance applications, In *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2006)*, Bucharest, July 2006; 33.

[72] Karp B, Kung HT. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks, In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, Boston, Massachusetts, United States, 2000; 243–254.

[73] Nayak A, Stojmenovic I. *Wireless Sensor and Actuator Networks: Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication*. Wiley: Hoboken, New Jersey, 2010.

[74] Chen J, Lee Y-Z, Zhou H, Gerla M, Shu Y. Robust ad hoc routing for lossy wireless environment, In *IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2006)*, Washington, DC, October 2006; 1–7.

[75] Theoleyre F, Schiller E, Duda A. Efficient greedy geographical non-planar routing with reactive deflection, In *IEEE International Conference on Communications (ICC 2009)*, Dresden, June 2009; 1–5.

[76] Ding R, Yang L. A reactive geographic routing protocol for wireless sensor networks, In *Sixth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP 2010)*, Brisbane, QLD, December 2010; 31–36.

[77] Prasad R, Mihovska A. *New Horizons in Mobile and Wireless*

Communications: Volume 4-Ad Hoc and PANs. Artech House, ISBN: 9781607839736: Norwood, MA, 2009.

[78] Ko Y, Vaidya NH. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. *Wireless Networks* 2000; 6: 307–321.

[79] Hnatyshin V, Ahmed M, Cocco R, Urbano D. A comparative study of location aided routing protocols for MANET, In *IFIP Wireless Days (WD)* , Niagara Falls, ON, October 2011; 1–3.

[80] Wang N-C, Chang S-W. A reliable on-demand routing protocol for mobile ad hoc networks with mobility prediction. *Computer Communications* 2005; 29(1): 123–135.

[81] Hasanlou M, Mohammadi H. MPRP: a novel mobility prediction algorithm for improving routing protocols of mobile ad hoc networks, In *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tehran, 2008.

[82] Sathyaraj B, Doss R. Route maintenance using mobility prediction for mobile ad hoc networks, In *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, Washington, DC, November 2005; 6 pp. –101.

[83] Meng L, Zang J, Fu W. A novel ad hoc routing protocol research based on mobility prediction algorithm, In *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, September 2005; 791–794.

[84] Shirani R, St-Hilaire M, Kunz T, Zhou Y, Li J, Lamont L. Combined reactive-geographic routing for unmanned aeronautical ad-hoc networks, In *8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Limassol, August 2012; 820–826.

[85] Wu Y-C, Chaudhari Q, Serpedin E. Clock synchronization of wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine* 2011; 28(1): 124–138.

[86] Choi B, Liang H, Shen XM, Zhuang WH. DCS: distributed asynchronous clock synchronization in delay tolerant networks. *IEEE*

Transactions on Parallel and Distributed Systems 2012; 23(3): 491–504.

[87] Shirani R, St-Hilaire M, Kunz T, Zhou Y, Li J, Lamont L. The performance of greedy geographic forwarding in unmanned aeronautical ad-hoc networks, In Ninth Annual Conference on Communication Networks and Services Research (CNSR), Ottawa, Canada, May 2011; 161–166.

[88] OPNET, application and network performance. Available from: <http://www.opnet.com>. [Accessed on September 2012]

[89] Unmanned aerial vehicles classification. Available from: <http://www.vectorsite.net/twuav.html>. [Accessed on September 2012]

[90] Громаков Ю.А. Концепции развития мобильной и беспроводной связи общего пользования // Электросвязь. — 2008. — № 12. — С. 51—57.

[91] Internet Engineering Task Force (IETF). Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter. [Электронный ресурс] — Режим доступа до журн.: <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>

[92] Perkins C.E. Ad Hoc Networking / Perkins C.E. - Addison-Wesley Professional, 2001. — 452 p.

[93] Романюк В.А. Мобильные радиосети — перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. — 2003. — № 12. — С. 62-68.

[94] Дымарский Я.С., Крутикова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. — М.: НТЦ “Мобильные коммуникации”, 2003. — 384 с.

[95] Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 288 с.

[96] Kahn R. Advances in Packet Radio Technology // Proc, of the IEEE. — 1978. - 66. - P. 1468-1496.

[97] Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. — К.: Техніка, 1989. — 223 с.

[98] Yi Li, Rostam Shirani, Marc St-Hilaire, Thomas Kunz . Improving

routing in networks of Unmanned Aerial Vehicles: Reactive-Greedy-Reactive.

[99] Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк